

Universidade de Lisboa
Faculdade de Ciências
Departamento de Física



**Metrologia Óptica Aplicada à
Observação Dimensional Terrestre de Infraestruturas
em Regime Dinâmico**

Doutoramento em Engenharia Física

Luís Filipe Lages Martins

Tese orientada pelo Professor Doutor José Manuel Nunes Vicente Rebordão
e pelo Doutor Álvaro Silva Ribeiro

2015

Documento especialmente elaborado para a obtenção do grau de doutor

Universidade de Lisboa
Faculdade de Ciências
Departamento de Física



**Metrologia Óptica Aplicada à
Observação Dimensional Terrestre de Infraestruturas
em Regime Dinâmico**

Luís Filipe Lages Martins

Tese orientada pelo Professor Doutor José Manuel Nunes Vicente Rebordão e pelo
Doutor Álvaro Silva Ribeiro, especialmente elaborada para a obtenção do grau de
doutor em Engenharia Física

2015

Orientadores

Professor Doutor José Manuel Nunes Vicente Rebordão

Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Departamento de Física

Doutor Álvaro Silva Ribeiro

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Centro de Instrumentação Científica

Este trabalho foi financiado por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito da Bolsa de Investigação com a referência SFRH/BD/76367/2011, e cofinanciado por Bolsa de Investigação Científica do LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Tese elaborada no LNEC e submetida para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Física pela FCUL – Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, no âmbito do protocolo de cooperação entre o LNEC e a FCUL.

RESUMO

A observação dimensional terrestre de infraestruturas constitui uma atividade relevante para a detecção atempada de danos e garantia de segurança. Neste âmbito, a medição pontual ou permanente do deslocamento dinâmico de uma grande obra contribui para a melhoria do conhecimento da sua condição estrutural, constituindo um significativo desafio instrumental no que respeita às distâncias de observação envolvidas e à agressividade ambiental associada à realização de medições em campo.

No conjunto de soluções de medição emergentes que procuram dar uma resposta satisfatória a esta necessidade no contexto da Engenharia Civil, a presente tese apresenta o estudo metrológico de método óptico para a medição dimensional terrestre de infraestruturas dinâmicas. Pelo impacto que possuem no processo de medição desenvolvido, são discutidos os aspetos de aquisição e processamento de imagem dos alvos e a influência do meio de propagação, nomeadamente, através dos fenómenos atmosféricos de atenuação, refração e turbulência.

São igualmente descritos os métodos de caracterização metrológica do sistema de medição nas vertentes dimensional e geométrica dos seus principais elementos constituintes: câmara digital e referencial de medição composto por alvos ativos com LEDs. É também apresentado o método de calibração proposto para o estabelecimento de rastreabilidade do sistema de medição, sendo descrito o protótipo experimental de padrão de referência desenvolvido para esse efeito.

As metodologias desenvolvidas foram concretizadas experimentalmente numa ponte suspensa de elevada dimensão – a Ponte 25 de Abril – tendo-se assegurado a medição de deslocamento do seu $\frac{1}{2}$ vão principal em diferentes situações operacionais. A discussão de resultados abrange, igualmente, a parametrização intrínseca da câmara com elevada distância focal utilizada, a correção do efeito sistemático de refração vertical, a quantificação do efeito aleatório de feixe errante, os desvios de calibração e respetivas incertezas de medição por aplicação do Método de Monte Carlo em processo de otimização não-linear multivariável.

Palavras chave: Metrologia Óptica, Deslocamento dinâmico, Infraestrutura.

ABSTRACT

The dimensional terrestrial observation of large-scale structures is a relevant activity for early damage detection and safety assurance. In this context, the occasional or permanent dynamic displacement measurement in a high dimension construction contributes for knowledge improvement of its structural condition, being a significant instrumental challenge in terms of established observation distances and of environmental aggressiveness when performing field measurements.

In the group of emergent measurement solutions which try to comply to this instrumental requirement in the Civil Engineering context, this thesis presents the metrological study of an optical method for dimensional terrestrial measurement of dynamic large-scale structures. Due to their impact on the developed measurement process, a discussion is promoted about image acquisition and processing and also concerning the influence of the propagation medium, namely, through attenuation, refraction and turbulence atmospheric phenomena.

Metrologic characterization methods are also described, ranging the dimensional and geometrical aspects of the measurement system's main components: the digital camera and the measurement referential composed by LED active targets. In addition, the proposed calibration method for the establishment of the measurement system's traceability is presented and the related reference measurement standard experimental prototype is also described.

The developed methodologies were tested in a long-span suspension bridge – the 25th of April Bridge – allowing the displacement measurement of its ½ main span in different operational scenarios. The experimental results discussion includes the intrinsic parameterization of the applied high focal length camera, the correction of the vertical refraction systematic effect, the beam wandering random effect quantification, the calibration deviations and related measurement uncertainties obtained by the use of the Monte Carlo Method in a multivariable, non-linear optimization process.

Keywords: Optical Metrology, Dynamic displacement, Large-scale structure.

I. ÍNDICE GERAL

II.	ÍNDICE DE MATÉRIAS	VII
III.	ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
IV.	ÍNDICE DE QUADROS	XXI
V.	ÍNDICE DE SÍMBOLOS.....	XXV
VI.	ÍNDICE DE SIGLAS E ACRÓNIMOS	XXXIII
VII.	AGRADECIMENTOS.....	XXXVII
VIII.	PUBLICAÇÕES.....	XXXIX
1.	INTRODUÇÃO	1
2.	ESTADO DOS CONHECIMENTOS	9
3.	METODOLOGIA ÓPTICA PARA MEDIÇÃO DIMENSIONAL DE INFRAESTRUTURAS DINÂMICAS	93
4.	OBSERVAÇÃO DIMENSIONAL DINÂMICA DE UMA PONTE SUSPensa.....	189
5.	CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE EVOLUÇÃO FUTURA	311
	BIBLIOGRAFIA	323
	ANEXOS	335

II. ÍNDICE DE MATÉRIAS

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Fases de desenvolvimento	4
1.4 Organização.....	6
2. ESTADO DOS CONHECIMENTOS.....	9
2.1 Introdução.....	9
2.2 Metrologia óptica de visão computacional	10
2.2.1 Definição, âmbito e enquadramento	10
2.2.2 Evolução histórica	15
2.2.3 Aplicação na observação em Engenharia Civil	24
2.2.3.1 <i>Observação espacial e aérea</i>	24
2.2.3.2 <i>Observação terrestre</i>	26
2.3 Observação dimensional terrestre de infraestruturas	33
2.3.1 Enquadramento.....	33
2.3.2 Caracterização dimensional de infraestruturas	39
2.3.3 Métodos, instrumentos e sistemas de medição dimensional convencionais	46
2.3.3.1 <i>Medição por contacto</i>	46
2.3.3.2 <i>Medição por nivelamento hidrostático</i>	52
2.3.3.3 <i>Medição com fio de prumo</i>	53
2.3.3.4 <i>Medição geodésica</i>	55
2.3.3.5 <i>Fotogrametria terrestre</i>	57
2.3.4 Métodos, instrumentos e sistemas de medição dimensional emergentes.....	60
2.3.4.1 <i>Medição com GNSS</i>	60
2.3.4.2 <i>Medição interferométrica com sistema radar</i>	65
2.3.4.3 <i>Medição com sistemas laser</i>	70
2.3.4.4 <i>Medição óptica</i>	75
2.3.5 Medição dimensional indireta com recurso a registos temporais de aceleração.....	86
2.4 Considerações finais.....	88
3. METODOLOGIA ÓPTICA PARA MEDIÇÃO DIMENSIONAL DE INFRAESTRUTURAS DINÂMICAS	93
3.1 Introdução.....	93
3.2 Abordagem de medição	95
3.2.1 Configuração singular <i>versus</i> configuração múltipla	95
3.2.2 Configuração singular de câmara fixa	96
3.2.3 Configuração singular de câmara móvel	98
3.2.3.1 <i>Descrição da abordagem proposta</i>	98
3.2.3.2 <i>Vantagens e limitações</i>	100
3.2.4 Componentes do sistema de medição	102
3.2.4.1 <i>Nota introdutória</i>	102
3.2.4.2 <i>Objetiva e filtro óptico</i>	102
3.2.4.3 <i>Sensor de imagem</i>	104
3.2.4.4 <i>Alvos</i>	105
3.2.5 Especificidades em cenário de observação permanente	107
3.2.5.1 <i>Nota introdutória</i>	107
3.2.5.2 <i>Variação sazonal das condições ambientais</i>	108
3.2.5.3 <i>Exposição ambiental e operacional prolongada</i>	110
3.2.5.4 <i>Recursos de visão computacional</i>	111

3.3	Dimensionamento do sistema de medição	113
3.3.1	Nota introdutória	113
3.3.2	Posição espacial do referencial de medição.....	113
3.3.3	Resolução angular instrumental e requerida.....	113
3.3.4	Dimensão global dos alvos	122
3.3.5	Campo de visão	124
3.4	Aquisição e processamento digital de imagens dos alvos.....	128
3.4.1	Nota introdutória	128
3.4.2	Aquisição de imagem	128
3.4.3	Processamento de imagem	132
3.5	Modelação geométrica da câmara	139
3.5.1	Introdução.....	139
3.5.2	Câmara perspectiva	140
3.5.3	Equações de colinearidade.....	143
3.6	Influência do meio de propagação	149
3.6.1	Introdução.....	149
3.6.2	Atenuação atmosférica	150
3.6.2.1	Nota introdutória	150
3.6.2.2	Absorção	151
3.6.2.3	Dispersão	153
3.6.3	Refração atmosférica.....	157
3.6.4	Turbulência atmosférica	162
3.7	Caraterização metrológica da câmara	165
3.7.1	Introdução.....	165
3.7.2	Métodos convencionais de caraterização geométrica de câmaras	167
3.7.2.1	Transformação Linear Direta.....	167
3.7.2.2	Método de Tsai.....	168
3.7.2.3	Método de Zhang.....	170
3.7.3	Métodos emergentes de caraterização geométrica de câmaras.....	170
3.7.3.1	Método de ensaio de campo	170
3.7.3.2	Método goniométrico	172
3.7.3.3	Método DOE	173
3.8	Caraterização do referencial de medição	177
3.8.1	Nota introdutória	177
3.8.2	Caraterização dimensional e geométrica	177
3.9	Método de calibração dimensional	182
3.9.1	Introdução	182
3.9.2	Descrição do método de ensaio	183
3.9.3	Cadeia de rastreabilidade metrológica.....	185
3.10	Considerações finais.....	187
4.	OBSERVAÇÃO DIMENSIONAL DINÂMICA DE UMA PONTE SUSPensa.....	189
4.1	Introdução.....	189
4.2	Cenário de observação.....	190
4.3	Sistema de medição	196
4.3.1	Aplicação no cenário de observação.....	196
4.3.2	Câmara	198
4.3.3	Referencial de medição	201
4.4	Parametização intrínseca da câmara.....	204
4.5	Influência térmica do meio de propagação	212
4.5.1	Refração atmosférica	212
4.5.2	Turbulência atmosférica	237

4.6 Rastreabilidade da medição dimensional ao SI	250
4.6.1 Introdução.....	250
4.6.2 Ensaio do referencial de medição	251
4.6.3 Ensaio do padrão de referência.....	254
4.6.4 Calibração do sistema de medição.....	258
4.6.4.1 <i>Descrição do ensaio e do processo de cálculo</i>	258
4.6.4.2 <i>Resultados da calibração em época de verão</i>	261
4.6.4.3 <i>Resultados da calibração em época de inverno</i>	266
4.7 Avaliação de incertezas de medição.....	272
4.7.1 Introdução.....	272
4.7.2 Estágio inicial.....	273
4.7.2.1 <i>Parâmetros intrínsecos</i>	273
4.7.2.2 <i>Coordenadas mundo dos alvos</i>	273
4.7.2.3 <i>Coordenadas imagem dos alvos</i>	281
4.7.2.4 <i>Deslocamento de referência</i>	282
4.7.3 Estágio intermédio.....	283
4.7.4 Estágio final.....	286
4.8 Medição de deslocamento em regime dinâmico.....	289
4.8.1 Descrição das campanhas de medição em campo	289
4.8.2 Deslocamento na ausência de tráfego ferroviário	297
4.8.3 Deslocamento na presença de tráfego ferroviário.....	298
5. CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE EVOLUÇÃO FUTURA	311
5.1 Considerações globais	311
5.2 Considerações específicas para sistema de observação permanente.....	320
BIBLIOGRAFIA	323
ANEXOS	335
ANEXO 1 – Expressões para cálculo da refratividade do ar húmido.....	A1.1
ANEXO 2 – Expressões do MMQ para cálculo dos parâmetros do modelo de potência do índice de refração vertical.....	A2.1

III. ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2

2.1:	<i>Inspeção visual com UAV</i>	26
2.2:	<i>Processamento digital de imagem de uma superfície de betão com fissura</i>	26
2.3:	<i>Câmara termográfica</i>	27
2.4:	<i>Visão térmica da superfície exterior de uma habitação</i>	27
2.5:	<i>Representação do processo de medição óptica PIV</i>	29
2.6:	<i>Sistema estereoscópico de correlação de imagem aplicado em ensaio laboratorial</i>	31
2.7:	<i>Exemplo de resultado de medição dimensional</i>	31
2.8 e 2.9:	<i>Observação de tirantes da Ponte Internacional sobre o rio Guadiana</i>	33
2.10:	<i>Exemplos de linhas de influência em viaduto</i>	42
2.11:	<i>Ensaio de carga na P25A – carga concentrada</i>	42
2.12:	<i>Ensaio de carga na P25A – carga distribuída</i>	42
2.13:	<i>Ensaio de vibração forçada numa barragem de betão com gerador de vibração de massas excêntricas</i>	43
2.14 e 2.15:	<i>Ensaio de vibração livre na fundação da P25A</i>	44
2.16 e 2.17:	<i>Ensaio de vibração ambiente com medição de aceleração</i>	45
2.18:	<i>Medição do deslocamento vertical do vão de um viaduto com recurso a defletómetro de tambor</i>	47
2.19:	<i>Pontos de referência para análise de convergência em perfis de túneis</i>	47
2.20 e 2.21:	<i>Medição dimensional na viga de rigidez da P25A com recurso a alongâmetro</i>	48
2.22:	<i>Alongâmetro e padrão de ínvar</i>	49
2.23:	<i>Base plana para medição em obra</i>	49
2.24:	<i>Base para medição de deslocamento tridimensional entre blocos de uma barragem de betão</i>	49
2.25:	<i>Medição dimensional com recurso a cadeias de medição com sensores elétricos de deslocamento em aparelhos de apoio</i>	50
2.26:	<i>Medição dimensional com recurso a cadeias de medição com sensores elétricos de deslocamento em vãos de pontes e viadutos</i>	50
2.27:	<i>Medição dimensional com recurso a cadeias de medição com sensores elétricos de deslocamento em juntas de barragens de betão</i>	50
2.28:	<i>Representação esquemática do circuito eletromagnético associado a um sensor elétrico do tipo LVDT</i>	51

2.29:	<i>Componentes do sistema de nivelamento hidrostático: célula de pressão e reservatório de referência.....</i>	52
2.30 e 2.31:	<i>Método do fio de prumo: direito e invertido</i>	54
2.32:	<i>Medição de deslocamentos horizontais no interior de uma barragem de betão: base para medição manual</i>	54
2.33:	<i>Medição de deslocamentos horizontais no interior de uma barragem de betão: coordenómetro óptico.....</i>	54
2.34:	<i>Medição de deslocamentos horizontais no interior de uma barragem de betão: telecoordenómetro.....</i>	54
2.35:	<i>Observação geodésica de barragem de betão com recurso a taqueómetro.....</i>	55
2.36:	<i>Medição fotogramétrica em pontes.....</i>	58
2.37:	<i>Medição fotogramétrica em barragens de aterro.....</i>	58
2.38:	<i>Medição fotogramétrica em ensaio de componentes estruturais</i>	58
2.39:	<i>Observação dimensional de ponte suspensa com sistema de pseudossatélites.....</i>	65
2.40:	<i>Observação terrestre de infraestruturas com recurso a radar tipo RAR.....</i>	67
2.41:	<i>Observação terrestre de infraestruturas com recurso a radar tipo SAR</i>	67
2.42:	<i>Exemplos de elementos de sistemas laser para medição de deslocamentos em obras de grande dimensão</i>	70
2.43:	<i>Sistema de varrimento laser.....</i>	73
2.44:	<i>Exemplo de modelo digital obtido para uma barragem de aterro.....</i>	73
2.45 a 2.47:	<i>Central de observação óptica na fundação da torre norte (P4) da P25A (1966-1977).....</i>	76
2.48:	<i>Representação esquemática do sistema optoeletromecânico da P25A (1966-1977).....</i>	77
2.49:	<i>Alvo passivo instalado na ponte suspensa Humber</i>	79
2.50:	<i>Configurações geométricas do processo de medição óptica</i>	80
2.51:	<i>Imagem dos alvos passivos de referência e medição na configuração b.....</i>	80
2.52:	<i>Alvo ativo instalado na ponte suspensa Vincent Thomas.....</i>	82
2.53:	<i>Ponte suspensa sujeita a observação por meios ópticos.....</i>	84
2.54:	<i>Geometria do alvo ativo.....</i>	85
2.55:	<i>Exemplos de imagens do alvo obtidas no ensaio de observação a longa distância.....</i>	85
2.56:	<i>Câmara digital com objetiva de elevada distância focal</i>	86
2.57:	<i>Estrutura com alvos ativos e cadeias de medição vertical e horizontal</i>	86

Capítulo 3

3.1:	<i>Classificação esquemática de abordagens ópticas para medição dimensional.....</i>	96
3.2:	<i>Diagrama funcional do processo de medição.....</i>	99
3.3:	<i>LEDs com encapsulamento semiesférico de dimensão variável.....</i>	107
3.4:	<i>Alvo ativo composto por múltiplos LEDs.....</i>	107
3.5:	<i>Representação esquemática da resolução angular instrumental de uma câmara.....</i>	114
3.6:	<i>Resolução angular instrumental para $\eta=1/4$ píxel.....</i>	115
3.7:	<i>Resolução angular instrumental para $\eta=1/2$ píxel.....</i>	115
3.8:	<i>Resolução angular instrumental para $\eta=3/4$ píxel.....</i>	116
3.9:	<i>Resolução angular instrumental para $\eta=1$ píxel.....</i>	116
3.10:	<i>Intervalos de resolução angular instrumental para câmaras comerciais.....</i>	117
3.11:	<i>Resolução angular requerida para medição de deslocamento na direção X.....</i>	118
3.12:	<i>Resolução angular requerida para medição de deslocamento na direção Z.....</i>	118
3.13:	<i>Resolução angular requerida para medição de deslocamento na direção Y.....</i>	118
3.14:	<i>Resolução angular requerida para medição de deslocamento $\Delta X = 1$ mm ou $\Delta Y = 1$ mm.....</i>	119
3.15:	<i>Resolução angular requerida para medição de deslocamento $\Delta X = 10$ mm ou $\Delta Y = 10$ mm.....</i>	119
3.16:	<i>Resolução angular requerida para medição de deslocamento 1 mm na direção longitudinal.....</i>	121
3.17:	<i>Resolução angular requerida para medição de deslocamento 10 mm na direção longitudinal.....</i>	121
3.18:	<i>Caraterização dimensional de alvos: círculo individual, coroa circular, xadrez e cruz.....</i>	122
3.19:	<i>Dimensão global mínima do alvo para $7 \times \text{GSD}$.....</i>	123
3.20:	<i>Campo de visão horizontal para um sensor com dimensões reduzidas (3,6 mm \times 2,7 mm).....</i>	126
3.21:	<i>Campo de visão vertical para um sensor com dimensões reduzidas (3,6 mm \times 2,7 mm).....</i>	126
3.22:	<i>Campo de visão horizontal para um sensor com dimensões elevadas (36 mm \times 24 mm).....</i>	127
3.23:	<i>Campo de visão vertical para um sensor com dimensões elevadas (36 mm \times 24 mm).....</i>	127
3.24:	<i>Efeito de quantização no nível de exatidão de algumas técnicas de processamento digital de imagem.....</i>	138
3.25:	<i>Efeito do limite de thresholding no nível de exatidão de algumas técnicas de processamento digital de imagem.....</i>	138

3.26:	<i>Efeito da dimensão do alvo no nível de exatidão de algumas técnicas de processamento digital de imagem</i>	138
3.27:	<i>Efeito de saturação no nível de exatidão de algumas técnicas de processamento digital de imagem</i>	138
3.28:	<i>Efeito do offset no nível de exatidão de algumas técnicas de processamento digital de imagem</i>	138
3.29:	<i>Projeção central de ponto do espaço para o plano imagem</i>	140
3.30:	<i>Sistemas de coordenadas imagem (x, y) e câmara (x_{cam}, y_{cam})</i>	141
3.31:	<i>Transformação euclidiana entre sistemas de coordenadas mundo e câmara</i>	142
3.32.a:	<i>Representação do efeito de distorção radial: sem distorção</i>	145
3.32.b:	<i>Representação do efeito de distorção radial: distorção positiva ou em almofada</i>	145
3.32.c:	<i>Representação do efeito de distorção radial: distorção negativa ou em barril</i>	145
3.33:	<i>Transmitância atmosférica ao nível do mar (medida num trajeto horizontal de 1820 m)</i> .	151
3.34:	<i>Relação entre a transmitância e o comprimento de onda com absorção molecular da água</i>	152
3.35:	<i>Relação entre a transmitância e o comprimento de onda com absorção molecular do dióxido de carbono</i>	152
3.36:	<i>Relação entre a transmitância e o comprimento de onda com absorção por aerossóis</i>	153
3.37:	<i>Absorção global – absorção combinada por moléculas de água, dióxido de carbono e aerossóis em ambiente urbano</i>	153
3.38:	<i>Representação esquemática da relação entre a dimensão característica, as condições atmosféricas e os tipos de dispersão</i>	154
3.39:	<i>Secção transversal de dispersão de Rayleigh em função do comprimento de onda de radiação no infravermelho próximo</i>	155
3.40:	<i>Refração vertical em cenário de observação a longa distância com gradiente térmico positivo</i>	159
3.41:	<i>Representação das forças verticais que atuam num elemento infinitesimal de ar</i>	163
3.42:	<i>Exemplos de configurações geométricas adotadas no âmbito do método de ensaio de campo</i>	171
3.43:	<i>Montagem experimental no método goniométrico e respetiva representação esquemática</i>	172
3.44:	<i>Representação do método DOE</i>	173
3.45:	<i>Padrão de difração</i>	173
3.46:	<i>Rede de difração</i>	174
3.47:	<i>Imagem da superfície do DOE obtida por microscopia atómica</i>	174
3.48:	<i>Padrões típicos de difração associados a redes ópticas difrativas</i>	175

3.49:	<i>Sistema de apalpação de MMC 3D.....</i>	179
3.50:	<i>Qualificação de ponteira de MMC 3D</i>	179
3.51:	<i>Calibração de MMC 3D com recurso a padrão escalonado</i>	180
3.52:	<i>Calibração de MMC 3D com recurso a blocos padrão.....</i>	180
3.53:	<i>Calibração de MMC 3D com recurso a interferómetro laser.....</i>	180
3.54:	<i>Representação do ensaio de calibração dimensional do sistema de medição</i>	184
3.55:	<i>Diagrama funcional do processo de calibração.....</i>	184
3.56:	<i>Cadeia de rastreabilidade dimensional para o sistema de medição</i>	186

Capítulo 4

4.1:	<i>A P25A e região envolvente das margens norte e sul do rio Tejo em Lisboa</i>	190
4.2:	<i>Perfil transversal da viga de rigidez e tabuleiro da P25A na 1ª fase de construção</i>	191
4.3:	<i>Perfil transversal da viga de rigidez e tabuleiros da P25A na 2ª fase de construção.....</i>	191
4.4:	<i>Alçado longitudinal da P25A.....</i>	191
4.5:	<i>Deformação vertical da P25A durante ensaio de carga distribuída.....</i>	193
4.6:	<i>Plano geral de observação a longo prazo (1966-1977) da P25A.....</i>	194
4.7:	<i>Plano geral de instrumentação da P25A</i>	195
4.8:	<i>Representação esquemática da configuração de medição na P25A.....</i>	196
4.9:	<i>Deslocamento longitudinal da viga de rigidez da P25A junto aos pilares P1, P2, P5 e P7 (lado este).....</i>	197
4.10 e 4.11:	<i>Sensor de imagem utilizado e respetiva sensibilidade espectral</i>	199
4.12 e 4.13:	<i>Placa de aquisição de imagem e janela da aplicação</i>	199
4.14:	<i>Teleobjetiva.....</i>	200
4.15:	<i>Duplicador óptico</i>	200
4.16 e 4.17:	<i>Filtro óptico e respetiva transmitância espectral.....</i>	201
4.18:	<i>Referencial de medição com alvos ativos</i>	202
4.19:	<i>Perfil de intensidade relativa em função do comprimento de onda.....</i>	203
4.20:	<i>Perfil de intensidade relativa em função do ângulo em relação ao eixo óptico do LED....</i>	203
4.21:	<i>Relação entre intensidade de corrente direta e intensidade radiante relativa</i>	203
4.22:	<i>Relação entre intensidade de corrente e tensão elétrica direta.....</i>	203
4.23:	<i>Montagem experimental no Laboratório de Óptica, Lasers e Sistemas da FCUL</i>	204
4.24:	<i>Rede de difração</i>	205
4.25:	<i>Pontos de difração com efeitos indesejados (saturação, franjas de difração, desfocagem e reflexões)</i>	206
4.26:	<i>Processamento digital de imagem das ordens de difração observadas: imagem original, binária e final com centro geométrico (azul – centro binário, verde – centro binário após abertura, vermelho – máximo gaussiano)</i>	206

4.27:	<i>Representação logarítmica de uma imagem típica dos pontos de difração.....</i>	207
4.28:	<i>Indicação de anel de focagem na teleobjetiva utilizada</i>	207
4.29:	<i>Processo iterativo adotado na avaliação de incertezas de medição dos parâmetros intrínsecos.....</i>	210
4.30.a:	<i>Função densidade de probabilidade normalizada da coordenada do ponto principal na direção x.....</i>	211
4.30.b:	<i>Função densidade de probabilidade normalizada da coordenada do ponto principal na direção y.....</i>	211
4.30.c:	<i>Função densidade de probabilidade normalizada da distância focal</i>	211
4.31:	<i>Tripé e perfil equipado com sensores termohigrométricos.....</i>	212
4.32:	<i>Regiões de medição termohigrométrica na fundação da torre sul e no ½ vão principal ...</i>	213
4.33:	<i>Medições da velocidade do vento na fundação da torre sul</i>	214
4.34:	<i>Medições da velocidade do vento no ½ vão principal</i>	214
4.35:	<i>Registo temporal da temperatura do ar no ½ vão principal.....</i>	214
4.36:	<i>Registo temporal da humidade relativa do ar no ½ vão principal.....</i>	215
4.37:	<i>Registo temporal da velocidade do vento no ½ vão principal</i>	215
4.38:	<i>Registo temporal da temperatura do ar na fundação da torre sul.....</i>	216
4.39:	<i>Registo temporal da humidade relativa do ar na fundação da torre sul.....</i>	216
4.40:	<i>Registo temporal da velocidade do vento na fundação da torre sul</i>	216
4.41:	<i>Distribuição vertical da temperatura do ar no ½ vão principal.....</i>	219
4.42:	<i>Distribuição vertical da humidade relativa do ar no ½ vão principal.....</i>	219
4.43:	<i>Distribuição vertical índice de refração no ½ vão principal.....</i>	220
4.44:	<i>Distribuição vertical da temperatura do ar na fundação da torre sul.....</i>	220
4.45:	<i>Distribuição vertical da humidade relativa do ar na fundação da torre sul.....</i>	221
4.46:	<i>Distribuição vertical índice de refração na fundação da torre sul.....</i>	221
4.47:	<i>Gradiente térmico vertical da temperatura do ar na superfície de topo da fundação da torre sul (2013-06-05).....</i>	223
4.48:	<i>Gradiente vertical do índice de refração na superfície de topo da fundação da torre sul (2013-06-05).....</i>	225
4.49:	<i>Registo temporal da temperatura do ar (2013-07-09).....</i>	226
4.50:	<i>Registo temporal de humidade relativa (2013-07-09)</i>	226
4.51:	<i>Registo temporal da velocidade do vento (2013-07-09)</i>	227
4.52:	<i>Evolução temporal do índice de refração calculado (2013-07-09).....</i>	227
4.53:	<i>Evolução dos ângulos de refração vertical para diferentes posições verticais do alvo na fundação da torre sul (2013-06-05).....</i>	230
4.54:	<i>Evolução dos desvios de refração vertical para diferentes posições verticais do alvo na fundação da torre sul (2013-06-05).....</i>	231

4.55:	<i>Distribuição vertical da temperatura do ar na fundação da torre sul (verão e inverno) ...</i>	232
4.56:	<i>Distribuição vertical da humidade do ar na fundação da torre sul (verão e inverno)</i>	232
4.57:	<i>Distribuição vertical do índice de refração na fundação da torre sul (verão e inverno) ...</i>	233
4.58:	<i>Gradiente vertical da temperatura do ar junto à superfície de topo da fundação da torre sul no verão e no inverno</i>	234
4.59:	<i>Gradiente vertical do índice de refração junto à superfície de topo da fundação da torre sul no verão e no inverno</i>	235
4.60:	<i>Relação entre o ângulo de refração vertical e a altura ao solo (verão e inverno)</i>	236
4.61:	<i>Relação entre o desvio de refração vertical e a altura ao solo (verão e inverno)</i>	236
4.62:	<i>Configuração geométrica adotada nos ensaios de campo na P25A para avaliação de feixe errante: (a) fundação da torre sul; (b) ancoragem sul</i>	240
4.63.a:	<i>Ancoragem sul da P25A</i>	241
4.63.b:	<i>Nicho de instalação da câmara</i>	241
4.63.c:	<i>Montagem da câmara no tripé de observação</i>	241
4.63.d:	<i>Linha de visão para a fundação da torre sul</i>	241
4.64.a:	<i>Referencial de medição na fundação da torre sul</i>	241
4.64.b:	<i>Linha de visão para a ancoragem sul</i>	241
4.65:	<i>Etapas do processamento digital de imagem – imagem original, imagem binária, imagem do contorno, imagem de ajuste de elipse</i>	243
4.66:	<i>Imagem global do referencial no ensaio de feixe errante no verão e pormenor da imagem do alvo</i>	244
4.67:	<i>Registo de coordenadas imagem (píxeis) dos centros dos alvos na direção x em ensaio de feixe errante</i>	245
4.68:	<i>Registo de coordenadas imagem (píxeis) dos centros dos alvos na direção y em ensaio de feixe errante</i>	245
4.69:	<i>Imagem global do referencial no ensaio de feixe errante no inverno e pormenor da imagem do alvo</i>	247
4.70:	<i>Desvios padrão experimentais das amostras de coordenadas imagem dos alvos (direção horizontal)</i>	248
4.71:	<i>Desvios padrão experimentais das amostras de coordenadas imagem dos alvos (direção vertical)</i>	248
4.72:	<i>Ensaio dimensional do referencial de medição com identificação dos alvos e sistema de coordenadas mundo</i>	251
4.73:	<i>Ensaio dimensional do padrão de referência com identificação dos alvos e sistema de coordenadas mundo</i>	251
4.74:	<i>Distribuição dos LEDs medidos no alvo</i>	252
4.75:	<i>Medição por contacto da superfície semiesférica de um LED</i>	252

4.76:	<i>Posições de referência estudadas no dispositivo de transferência</i>	255
4.77.a:	<i>Ancoragem sul da P25A.....</i>	259
4.77.b:	<i>Câmara no tripé de observação na ancoragem sul</i>	259
4.77.c:	<i>Montagem do referencial no dispositivo de transferência na fundação da torre sul.....</i>	259
4.77.d:	<i>Referencial de medição em posição longitudinal de calibração.....</i>	259
4.78:	<i>Evolução da temperatura do ar durante o ensaio de calibração no verão.....</i>	261
4.79:	<i>Evolução da humidade relativa durante o ensaio de calibração no verão.....</i>	262
4.80.a:	<i>Alvos nas posições de referência inicial</i>	263
4.80.b:	<i>Alvos nas posições de referência longitudinal.....</i>	263
4.80.c:	<i>Alvos nas posições de referência transversal</i>	263
4.80.d:	<i>Alvos nas posições de referência vertical</i>	264
4.81:	<i>Aplicação de correção de refração vertical nos desvios de calibração na época de verão</i>	266
4.82:	<i>Evolução da temperatura do ar durante o ensaio de calibração no inverno.....</i>	267
4.83:	<i>Evolução da humidade relativa durante o ensaio de calibração no inverno.....</i>	267
4.84.a:	<i>Alvos nas posições de referência inicial</i>	268
4.84.b:	<i>Alvos nas posições de referência longitudinal.....</i>	268
4.84.c:	<i>Alvos nas posições de referência transversal</i>	269
4.84.d:	<i>Alvos nas posições de referência vertical</i>	269
4.85:	<i>Aplicação de correção de refração vertical nos desvios de calibração na época de inverno</i>	271
4.86:	<i>Propagação de incertezas de medição no processo de calibração do sistema de medição.....</i>	272
4.87:	<i>Refração vertical no ensaio de calibração do sistema de medição</i>	278
4.88:	<i>Diagrama funcional de propagação de incerteza de medição associada à correção do efeito de refração vertical</i>	278
4.89:	<i>Distribuições normalizadas do efeito de correção de refração vertical nos cenários de de observação: altura do alvo 0,32 m no verão e altura do alvo 0,82 m no inverno.....</i>	279
4.90.a:	<i>Análise de sensibilidade das componentes de incerteza das coordenadas mundo dos alvos na direção X.....</i>	280
4.90.b:	<i>Análise de sensibilidade das componentes de incerteza das coordenadas mundo dos alvos na direção Z.....</i>	280
4.90.c:	<i>Análise de sensibilidade das componentes de incerteza das coordenadas mundo dos alvos na direção Y com correção de refração</i>	280
4.90.d:	<i>Análise de sensibilidade das componentes de incerteza das coordenadas mundo dos alvos na direção Y sem correção de refração.....</i>	280
4.91:	<i>Incertezas expandidas (95%) de medição posicional da câmara em épocas distintas</i>	284

4.92.a:	<i>Função de distribuição de probabilidade da posição transversal do centro de projeção da câmara</i>	284
4.92.b:	<i>Função de distribuição de probabilidade da posição vertical do centro de projeção da câmara</i>	284
4.92.c:	<i>Função de distribuição de probabilidade da posição longitudinal do centro de projeção da câmara</i>	284
4.93.a:	<i>Contribuições para a incerteza de medição da coordenada mundo X_0 do centro de projeção da câmara</i>	285
4.93.b:	<i>Contribuições para a incerteza de medição da coordenada mundo Y_0 do centro de projeção da câmara</i>	285
4.93.c:	<i>Contribuições para a incerteza de medição da coordenada mundo Z_0 do centro de projeção da câmara</i>	285
4.94:	<i>Local de instalação do sistema de medição no $\frac{1}{2}$ vão principal da P25A</i>	290
4.95:	<i>Local de instalação do sistema de medição na fundação da torre sul da P25A</i>	290
4.96:	<i>Representação esquemática da ligação da estrutura de alojamento à viga de rigidez</i>	291
4.97:	<i>Montagem da câmara no $\frac{1}{2}$ vão principal da P25A</i>	292
4.98:	<i>Imagens do referencial obtidas nos ensaios de medição de deslocamento do $\frac{1}{2}$ vão principal da P25A com abertura $f/32$</i>	293
4.99:	<i>Imagens do referencial obtidas nos ensaios de medição de deslocamento do $\frac{1}{2}$ vão principal da P25A com abertura $f/22$</i>	293
4.100:	<i>Imagens do referencial obtidas nos ensaios de medição de deslocamento do $\frac{1}{2}$ vão principal da P25A com abertura $f/16$</i>	293
4.101:	<i>Imagens do referencial obtidas nos ensaios de medição de deslocamento do $\frac{1}{2}$ vão principal da P25A com abertura $f/5,6$</i>	293
4.102:	<i>Efeito de arrastamento observado durante a passagem de comboio na primeira campanha de medição na P25A (abertura $f/16$ e tempo de exposição de 20 ms)</i>	294
4.103:	<i>Etapas do processamento digital de imagem nos ensaios de medição de deslocamento: sub-imagem original; sub-imagem binária; e pormenor da localização dos centróides dos alvos na imagem original</i>	296
4.104:	<i>Deslocamentos transversal e vertical do $\frac{1}{2}$ vão principal da P25A na ausência de tráfego ferroviário (2014-03-26, 11:43 – 11:46)</i>	298
4.105:	<i>Passagem de comboio de passageiros no $\frac{1}{2}$ vão principal da P25A</i>	299
4.106:	<i>Deslocamentos transversal e vertical do $\frac{1}{2}$ vão principal da P25A com passagem de comboio de passageiros no sentido sul-norte (ensaio n.º 3) no verão</i>	301
4.107:	<i>Deslocamentos transversal e vertical do $\frac{1}{2}$ vão principal da P25A com passagem de comboio de passageiros no sentido norte-sul (ensaio n.º 2) no verão</i>	301

4.108:	<i>Deslocamentos transversal e vertical do ½ vão principal da P25A com passagem de comboio de passageiros no sentido sul-norte (ensaio n.º 4) no inverno.....</i>	302
4.109:	<i>Deslocamentos transversal e vertical do ½ vão principal da P25A com passagem de comboio de passageiros no sentido norte-sul (ensaio n.º 6) no inverno.....</i>	302
4.110:	<i>Pormenor do deslocamento vertical (sentido norte-sul – ensaio n.º 6)</i>	306
4.111:	<i>Pormenor do deslocamento vertical (sentido sul-norte – ensaio n.º 4)</i>	306
4.112:	<i>Estimativa da posição longitudinal de comboio (sentido sul-norte, ensaio n.º 4)</i>	307
4.113:	<i>Estimativa da posição longitudinal de comboio (sentido norte-sul, ensaio n.º 6)</i>	308
4.114.a:	<i>Rede de extensómetros instalados no ½ vão principal.....</i>	309
4.114.b:	<i>Exemplo de registo temporal de extensão no ½ vão principal com passagem de comboio no sentido norte-sul.....</i>	309
4.114.c:	<i>Exemplo de registo temporal de deslocamento vertical do ½ vão principal com passagem de comboio no sentido norte-sul.....</i>	309

IV. ÍNDICE DE QUADROS

Capítulo 2

2.1:	<i>Medição óptica de grandezas no domínio do comprimento</i>	14
2.2:	<i>Satélites de observação espacial com maior utilização em Detecção Remota.....</i>	25
2.3:	<i>Principais grandezas físicas e padrões de trabalho na observação de obras nas áreas específicas da massa, pressão, força, termohigrometria, caudal e vibração</i>	36
2.4:	<i>Principais grandezas físicas e padrões de trabalho na observação de obras na área específica do comprimento</i>	37
2.5:	<i>Relação de paralelismo entre processos informativos SHM e humano.....</i>	38
2.6:	<i>Exemplos de aplicação de sistemas GNSS na observação de grandes obras.....</i>	61
2.7:	<i>Sistemas de posicionamento global que integram o sistema GNSS.....</i>	61
2.8:	<i>Aplicações de sistemas laser na observação dimensional em obras</i>	71
2.9:	<i>Exemplos de pontes sujeitas a observação dimensional por via óptica</i>	75
2.10:	<i>Análise comparativa de soluções para medição dimensional em infraestruturas dinâmicas.....</i>	89

Capítulo 3

3.1:	<i>Localização de regiões de interesse para concretização de abordagem óptica singular.....</i>	97
3.2:	<i>Categorias de objetivas e respetivos valores típicos de distância focal</i>	103
3.3:	<i>Comparação entre sensores CCD e CMOS.....</i>	105
3.4:	<i>Dimensões usuais dos sensores de imagem digital.....</i>	124
3.5:	<i>Dimensão computacional de imagem digital original.....</i>	129
3.6:	<i>Número de píxeis em alguns sensores de imagem digital.....</i>	130
3.7:	<i>Alguns formatos de imagem digital disponíveis em câmaras</i>	130
3.8:	<i>Soluções para transferência digital em câmaras.....</i>	131
3.9:	<i>Expressões de cálculo de centróides de objetos em imagens digitais</i>	136
3.10:	<i>Dimensão característica dos elementos constituintes da atmosfera terrestre.....</i>	151
3.11:	<i>Gamas de visibilidade para diferentes condições atmosféricas</i>	157
3.12:	<i>Elementos e resultados experimentais do método de ensaio de campo.....</i>	172
3.13:	<i>Número de pontos de medição por elemento geométrico em MMC 3D</i>	181

Capítulo 4

4.1:	<i>Principais características dimensionais da P25A e do viaduto norte.....</i>	191
4.2:	<i>Principais tipos de observações realizadas na P25A entre 1962 e 1966</i>	192
4.3:	<i>Instrumentação para observação a longo prazo da P25A</i>	195
4.4:	<i>Caraterísticas radiométricas e termoeletricas do LED utilizado (a 25 °C).....</i>	203
4.5:	<i>Principais características da rede de difração utilizada.....</i>	205
4.6:	<i>Estimativas de distância focal (mm).....</i>	208
4.7:	<i>Estimativas de coordenadas do ponto principal na direção x (píxel).....</i>	208
4.8:	<i>Estimativas de coordenadas do ponto principal na direção y (píxel).....</i>	208
4.9:	<i>Estimativas do coeficiente de distorção radial de 1ª ordem (10^{-6} m^{-2})</i>	208
4.10:	<i>Estimativas e incertezas de medição expandidas obtidas por simulação de Monte Carlo.....</i>	211
4.11:	<i>Coeficientes de correlação dos parâmetros intrínsecos</i>	212
4.12:	<i>Modelo paramétrico de potência da distribuição vertical da temperatura do ar na fundação da torre sul em 2013-06-05.....</i>	223
4.13:	<i>Modelo paramétrico de potência da distribuição vertical da humidade relativa na fundação da torre sul em 2013-06-05.....</i>	224
4.14:	<i>Modelo paramétrico de potência da distribuição vertical do índice de refração vertical na fundação da torre sul em 2013-06-05.....</i>	224
4.15:	<i>Ângulos e desvios de refração vertical obtidos pela abordagem do gradiente de índice de refração constante (2013-07-09 às 12:15).....</i>	228
4.16:	<i>Ângulos e desvios de refração vertical obtidos pela abordagem do gradiente de índice de refração constante (2013-07-09 às 12:45).....</i>	229
4.17:	<i>Comparação de ângulos e desvios de refração vertical obtidos por diferentes abordagens .</i>	229
4.18:	<i>Estimativas dos parâmetros dos modelos de potência de temperatura do ar, humidade relativa e índice de refração</i>	234
4.19:	<i>Valores observados e limite para gradientes térmicos verticais na fundação da torre sul em 2013-06-05</i>	238
4.20:	<i>Valores observados e limite para gradientes térmicos verticais na região inferior do ½ vão principal (em 2013-06-05).....</i>	238
4.21:	<i>Valores observados e limite para gradientes térmicos verticais na fundação da torre sul nas épocas de inverno e verão (às 15:00).....</i>	239
4.22:	<i>Parâmetros operacionais dos ensaios de feixe errante realizados no verão (2013-07-09)....</i>	243
4.23:	<i>Condições ambientais registadas nos ensaios de feixe errante realizados no verão (2013-07-09).....</i>	244
4.24:	<i>Desvios padrão experimentais das amostras (coordenadas imagem dos alvos)</i>	244
4.25:	<i>Parâmetros operacionais dos ensaios de feixe errante – inverno (2014-03-18).....</i>	246

4.26:	<i>Condições ambientais registradas nos ensaios de feixe errante realizados no inverno (2014-03-18).....</i>	247
4.27:	<i>Desvios padrão experimentais das amostras (coordenadas imagem dos alvos).....</i>	248
4.28:	<i>Resultados dos ensaios de repetibilidade da medição dimensional do referencial.....</i>	253
4.29:	<i>Influência do transporte e montagem entre ensaios laboratoriais e de campo.....</i>	253
4.30:	<i>Resultados das medições de deslocamento longitudinal de referência.....</i>	256
4.31:	<i>Desvios de retorno a zero no deslocamento longitudinal de referência.....</i>	256
4.32:	<i>Resultados das medições de deslocamento transversal de referência.....</i>	256
4.33:	<i>Desvios de retorno a zero no deslocamento transversal de referência.....</i>	256
4.34:	<i>Resultados das medições de deslocamento vertical de referência.....</i>	257
4.35:	<i>Desvios de retorno a zero no deslocamento vertical de referência.....</i>	257
4.36:	<i>Resumo de deslocamentos de referência para ensaio de calibração no verão.....</i>	257
4.37:	<i>Resumo de deslocamentos de referência para ensaio de calibração no inverno.....</i>	257
4.38:	<i>Parâmetros operacionais do sistema durante ensaios de calibração.....</i>	259
4.39:	<i>Condições ambientais registradas durante o ensaio de calibração no verão.....</i>	262
4.40:	<i>Resultados do ensaio de calibração no verão – deslocamento longitudinal.....</i>	263
4.41:	<i>Resultados do ensaio de calibração no verão – deslocamento transversal.....</i>	264
4.42:	<i>Resultados do ensaio de calibração no verão – deslocamento vertical.....</i>	264
4.43:	<i>Correções de refração vertical no ensaio de calibração no verão.....</i>	265
4.44:	<i>Condições ambientais registradas durante o ensaio de calibração no inverno.....</i>	268
4.45:	<i>Resultados do ensaio de calibração no inverno – deslocamento longitudinal.....</i>	269
4.46:	<i>Resultados do ensaio de calibração no inverno – deslocamento transversal.....</i>	269
4.47:	<i>Resultados do ensaio de calibração no inverno – deslocamento vertical.....</i>	270
4.48:	<i>Correções de refração vertical no ensaio de calibração no inverno.....</i>	271
4.49:	<i>Formulação probabilística dos parâmetros intrínsecos da câmara.....</i>	273
4.50:	<i>Fontes de incerteza da componente de ensaio dimensional do referencial.....</i>	275
4.51:	<i>Parâmetros do modelo de potência do índice de refração vertical junto à superfície de topo da fundação da torre sul da P25A.....</i>	277
4.52:	<i>Resultados das simulações de Monte Carlo – correção do efeito de refração vertical.....</i>	279
4.53:	<i>Componentes de incerteza das coordenadas mundo dos alvos.....</i>	280
4.54:	<i>Componentes de incerteza dos deslocamentos de referência.....</i>	283
4.55:	<i>Incertezas expandidas (95%) de medição dos desvios de calibração em época de verão.....</i>	287
4.56:	<i>Incertezas expandidas (95%) de medição dos desvios de calibração em época de inverno ..</i>	287
4.57:	<i>Campanhas de medição de deslocamento do 1/2 vão principal da P25A.....</i>	289
4.58:	<i>Valores de abertura da câmara e tempo de exposição nos ensaios de medição de deslocamento na P25A.....</i>	292
4.59:	<i>Valores médios e desvios padrão experimentais das condições ambientais.....</i>	297

4.60:	<i>Cargas de projeto do comboio de passageiros Série 3500-CP</i>	299
4.61:	<i>Condições ambientais registadas nos ensaios de medição de deslocamento na P25A na presença de tráfego ferroviário</i>	300
4.62:	<i>Deslocamentos transversais e verticais máximos observados nos ensaios de medição realizados na presença de tráfego ferroviário.....</i>	300
4.63:	<i>Velocidade de circulação de comboio estimada com base no registo temporal de posição vertical</i>	307
4.64:	<i>Instante de tempo de passagem do comboio na viga de rigidez</i>	307

V. ÍNDICE DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado e contexto de aplicação
a, b	Parâmetros associados ao modelo de potência
a, b, c, d, e, f, g	Parâmetros da curva quadrática generalizada para definição de elipse
a_0, a_1, a_2	Constantes para o cálculo do fator de compressibilidade do ar húmido
a', b'	Dimensões dos semieixos maior e menor da elipse
A	Área da superfície
A	Parâmetro de modelo empírico de atenuação atmosférica
A, B, C, D	Constantes para cálculo da pressão de saturação do vapor de água sobre água
A_G	Constante de dispersão geométrica ou não-seletiva
A_M	Constante de dispersão de Mie
A_R	Constante de dispersão de Rayleigh
\mathbf{A}_i	Matriz de configuração de coeficientes de sensibilidade i
a	Acelerómetro
A	ampere (unidade de base da intensidade de corrente elétrica)
Ar	Árgon
b_0, b_1	Constantes para o cálculo do fator de compressibilidade do ar húmido
B_1, B_2	Parâmetros de distorção planar <i>in-plane</i> ou <i>shearing</i>
\mathbf{b}	Vetor de discrepâncias entre valores aproximados e observados
bit	Unidade de informação digital
byte	Unidade de informação digital equivalente a 8 bits
c	Velocidade de propagação da luz no vázio ($2,997\,924\,58 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)
c_0, c_1	Constantes para o cálculo do fator de compressibilidade do ar húmido
CV	Campo de visão (horizontal ou vertical)
cd	Candela (unidade de base SI da intensidade luminosa)
cov	Covariância
\mathbf{C}	Vetor de coordenadas (X_0, Y_0, Z_0) do centro da câmara no mundo
$\mathbf{C}_{\hat{x}}$	Matriz de variância-covariância
CH_4	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO_2	Dióxido de carbono
d	Constante para o cálculo do fator de compressibilidade
d	Desvio de refração vertical
d	Dimensão global de um alvo
D	Distância de observação
DN	Número digital

Símbolo	Significado e contexto de aplicação
d	Vetor de coordenadas homogêneas ($X, Y, Z, 0$) associado à direção do feixe difratado
dB	Decibel
e	Carga elétrica do elétron
e	Constante para o cálculo do fator de compressibilidade
e	Enrolamento primário num LVDT
e	Extensômetro
f	Distância focal
f	Fator de melhoria (<i>enhancement factor</i>) de pressão de saturação do vapor de água
$f/\#$	Número f
$f(x, y)$	Função imagem que relaciona coordenadas imagem (x, y) com números digitais
$\overline{f}_{u,v}$	Valor médio dos números digitais da sub-região analisada com objeto modelo em (u, v)
f	Vetor de frequências espaciais (f_x, f_y) da rede de difração
g	Aceleração gravítica
g, g_x, g_y	Período espacial da rede de difração (global, na direção x e na direção y)
GSD	Resolução espacial
hr	Humidade relativa
h	Hora (unidade de tempo)
He	Hélio
Hz	hertz (unidade de frequência)
H_2	Hidrogénio
H_2O	Água
i	Índice (de linha da imagem, de posição vertical, de pares de valores ou de equação)
I_d	Intensidade de corrente elétrica direta num LED
I_r	Intensidade luminosa detetada a uma distância x
I_0	Intensidade luminosa inicialmente emitida
i	Região inicial da trajetória da luz junto aos alvos
I	Iodo
j	Índice de coluna da imagem
J	joule (unidade de energia)
k	Curvatura da trajetória da luz
k_0, k_1, k_2, k_3	Constantes para cálculo da refratividade do ar seco em condições normalizadas
K	Fator de escala no ajuste de uma distribuição gaussiana
K_i	Parâmetros de distorção radial de ordem i
K	Matriz de parametrização intrínseca
kg	Kilograma (unidade de base da massa)
K	kelvin (unidade de base da temperatura termodinâmica)

Símbolo	Significado e contexto de aplicação
Kr	Crípton
l_{inicial}	Posição inicial
l_{final}	Posição final
L	Coefficiente de auto-indução
L	Dimensão linear
L	Nível de quantização
L_e	Coefficiente de auto-indução do enrolamento primário do LVDT
L_i	Parâmetro i da Transformação Linear Direta
L_1	Coefficiente de auto-indução do enrolamento secundário 1 do LVDT
L_2	Coefficiente de auto-indução do enrolamento secundário 2 do LVDT
L	Longitudinal
$L1$	Onda portadora associada ao sinal GPS
$L2$	Onda portadora associada ao sinal GPS
m	Massa da partícula oscilante na dispersão de Rayleigh
m	Número de observações
m, n	Dimensões lineares da janela de computação
m_x, m_y	Fatores de escala
M	Coefficiente de indução mútua
M	Massa molar do ar
M_a	Massa molar do ar seco
M_w	Massa molar do vapor de água
M_1	Coefficiente de indução mútua entre enrolamentos primário e secundário 1
M_2	Coefficiente de indução mútua entre enrolamentos primário e secundário 2
\mathbf{m}	Vetor de incógnitas na parametrização intrínseca da câmara
m	Metro (unidade de base do comprimento)
m	Região da trajetória da luz a $\frac{1}{2}$ altura entre os alvos e a câmara
mol	Mole (unidade de base da quantidade de matéria)
n, n_i	Índice de refração do ar húmido (global ou na posição vertical i)
n	Número (de incógnitas ou de bits por píxel)
n, n_x, n_y	Número de ordem de difração (global ou nas direções x, y da rede de difração)
n_{as}	Índice de refração do ar seco em condições normalizadas sem dióxido de carbono
n_{axs}	Índice de refração do ar seco em condições normalizadas com dióxido de carbono
n_{ws}	Índice de refração do vapor de água puro em condições normalizadas
n_0	Índice de refração junto à fonte emissora
N	Refratividade
\mathbf{N}	Matriz auxiliar para resolução de sistema de equações normais

Símbolo	Significado e contexto de aplicação
N	newton (unidade de força)
Ne	Néon
NH ₃	Amoníaco
NO ₂	Dióxido de azoto
N ₂	Azoto
N ₂ O	Óxido de azoto
O	Centro óptico
O ₂	Oxigénio
O ₃	Ozono
p	Dimensão linear do píxel
p	Pressão atmosférica total
p	Probabilidade
p_{atm}	Pressão atmosférica
p_x, p_y	Distância métrica no eixo x ou y entre a origem na imagem e o ponto principal
p_{sat}	Pressão de saturação do vapor de água (sobre superfície líquida)
P_i	Parâmetros de distorção tangencial de ordem i
P	Matriz de projeção ou de pesos de ponderação das observações
P	Pilar da Ponte 25 de Abril
Pa	pascal (unidade de pressão)
ppm	Parte por milhão (1×10^{-6})
q	Parâmetro do modelo empírico de atenuação atmosférica
Q_̂	Matriz cofator
r	Dimensão caraterística das moléculas gasosas e partículas (meio dispersivo)
r_{ij}	Elementos constituintes da matriz de rotação R
R	Constante universal dos gases perfeitos
R_e	Resistência elétrica do enrolamento primário do LVDT
R_1	Resistência elétrica do enrolamento secundário 1 do LVDT
R_2	Resistência elétrica do enrolamento secundário 2 do LVDT
R	Matriz de rotação
\vec{r}	Representação paramétrica vetorial da trajetória da luz
r	Vetor de desalinhamento angular entre o feixe colimado e a normal à rede de difração
r₁, r₂, r₃	Linhas da matriz de rotação
r	Coefficiente de correlação
rad	Radiano (unidade de ângulo plano)
s	Desvio padrão
s	Dimensão (linear do sensor, de amostra de valores ou da trajetória não-retilínea da luz)

Símbolo	Significado e contexto de aplicação
s	Parâmetro de enviesamento ou obliquidade (<i>skew</i>)
S	Comprimento da trajetória não-retilínea da luz entre os alvos e a câmara
s	Segundo (unidade de base do tempo)
sr	Esterradiano (unidade de ângulo sólido)
t	Imagem do objeto modelo
t	Temperatura (expressa em grau Celsius)
t	Tempo
t	Trajetoária total da luz
\bar{t}	Valor médio dos números digitais associados à imagem do objeto modelo
T	Temperatura (expressa em kelvin)
T_1, T_2	Limites de <i>thresholding</i> do algoritmo de detecção de aresta ou fronteira de Canny
\mathbf{t}, \mathbf{T}	Vetores de translação
T	Termístor
T	Transversal
u, v	Coordenadas do objeto modelo na imagem
u_0, v_0	Coordenadas imagem do ponto principal expressas em píxel
\mathbf{u}	Vetor auxiliar para resolução de sistema de equações normais
u	Incerteza de medição padrão
v_{vento}	Velocidade do vento
\mathbf{v}	Vetor de erros aleatórios
var	Variância
V	Vertical
V	volt (unidade de tensão elétrica)
w_0, w_1, w_2, w_3	Constantes para cálculo da refratividade do vapor de água em condições normalizadas
W	Peso do elemento infinitesimal de ar
w	Anemómetro
W	watt (unidade de potência)
x	Origem do elemento estruturante em transformação morfológica de imagem
x, y	Coordenadas do ponto no referencial imagem (reais, com distorção)
x, y	Desvios em relação ao valor médio de número digital em ajuste de função gaussiana
x', y'	Coordenadas do ponto no referencial imagem (ideais, sem distorção)
x_c	Fração molar de dióxido de carbono no ar seco
$x_{\text{cam}}, y_{\text{cam}}, z_{\text{cam}}$	Sistema de coordenadas câmara
x_w	Fração molar de vapor de água no ar húmido
x_0	Parâmetro adimensional associado ao regime de dispersão
x_0, y_0	Coordenadas do centro geométrico do objeto

Símbolo	Significado e contexto de aplicação
X, Y, Z	Coordenadas do ponto no referencial mundo
X_0, Y_0, Z_0	Coordenadas mundo do centro de projeção da câmara
\mathbf{x}	Vetor de coordenadas cartesianas (x, y) do ponto na imagem
\mathbf{x}_1	Vetor de incógnitas associadas aos parâmetros intrínsecos
\mathbf{x}_2	Vetor de incógnitas associadas aos parâmetros extrínsecos
\mathbf{x}_3	Vetor de coordenadas mundo de um ponto no espaço tridimensional
$\tilde{\mathbf{x}}$	Vetor de coordenadas homogêneas (x_1, x_2, x_3) do ponto na imagem
$\hat{\mathbf{x}}$	Vetor de soluções (estimativas das incógnitas) no MMQ
\mathbf{X}	Vetor de coordenadas cartesianas (X, Y, Z) do ponto no mundo tridimensional
$\tilde{\mathbf{X}}$	Vetor de coordenadas homogêneas (X_1, X_2, X_3, X_4) do ponto no mundo tridimensional
Xe	Xénon
Y	Coordenada mundo vertical
Y_a, Z_a	Posição nominal dos alvos na fundação da torre sul
Y_c, Z_c	Posição nominal da câmara na ancoragem sul
Y_i	Posição vertical i para medição termohigrométrica
Y_0	Posição vertical da fonte emissora
Z	Fator de compressibilidade do ar húmido
α	Magnitude do gradiente vertical do índice de refração
α_a	Coefficiente de dispersão aerossol
α_m	Coefficiente de dispersão molecular
α_x, α_y	Distância focal expressa em unidades píxel nas direções x e y da imagem
α, β	Ângulos de rotação entre os sistemas de coords. feixe colimado e rede de difração
α, β, γ	Constantes para cálculo do fator de melhoria (<i>enhancement factor</i>) do vapor de água
β_a	Coefficiente de absorção aerossol
β_m	Coefficiente de absorção molecular
γ	Coefficiente de atenuação
$\gamma_B(X)$	Operação morfológica de abertura com elemento estruturante B no conjunto binário X
δ	Ângulo de refração vertical
δ_{calib}	Desvio de calibração
$\delta_B(X)$	Operação morfológica de dilatação com elemento estruturante B no conjunto binário X
Δl_{ref}	Deslocamento de referência
Δt	Intervalo de tempo de propagação da luz
Δx	Desvio de colinearidade na direção x da imagem
Δx_{radial}	Desvio de colinearidade na direção x da imagem por efeito de distorção radial
$\Delta x_{\text{tangencial}}$	Desvio de colinearidade na direção x da imagem por efeito de distorção tangencial
Δx_{planar}	Desvio de colinearidade na direção x da imagem por efeito de distorção planar

Símbolo	Significado e contexto de aplicação
Δy	Desvio de colinearidade na direção y da imagem
Δy_{radial}	Desvio de colinearidade na direção y da imagem por efeito de distorção radial
$\Delta y_{\text{tangencial}}$	Desvio de colinearidade na direção y da imagem por efeito de distorção tangencial
Δy_{planar}	Desvio de colinearidade na direção y da imagem por efeito de distorção planar
ΔX	Deslocamento transversal de um ponto no referencial mundo
ΔX_{ref}	Deslocamento transversal de referência no referencial mundo
ΔY	Deslocamento vertical de um ponto no referencial mundo
ΔY_{ref}	Deslocamento vertical de referência no referencial mundo
$\Delta Y_{\text{refração}}$	Desvio vertical por efeito de refração atmosférica
ΔZ	Deslocamento longitudinal de um ponto no referencial mundo
ΔZ_{ref}	Deslocamento longitudinal de referência no referencial mundo
$\Delta \theta_{\text{inst}}$	Resolução angular instrumental
$\Delta \theta_{\text{req}}$	Resolução angular requerida
ΔL	Transdutor de deslocamento
ε	Ângulo de elevação da trajetória ideal da luz
ε'	Ângulo de elevação da trajetória aparente da luz
$\varepsilon_B(X)$	Operação morfológica de erosão com elemento estruturante B no conjunto binário X
ε_0	Constante dielétrica no vazio
ε	Extensômetro
ζ	Parâmetro de proporção (<i>aspect ratio</i>)
η	Nível de exatidão sub-píxel
θ	Ângulo de rotação planar entre o eixo horizontal e o eixo maior da elipse
θ	Temperatura do ar
θ_n	Ângulo de difração do feixe de ordem n
θ_{xy}	Clinômetro
λ	Comprimento de onda
ν	Frequência de oscilação
π	Constante geométrica (3,141 592...)
ρ	Massa volúmica do ar húmido
ρ_a	Massa volúmica do ar seco em condições ambientais
ρ_{axs}	Massa volúmica do ar seco em condições normalizadas
ρ_{cc}	Correlação cruzada normalizada
ρ_w	Massa volúmica do vapor de água em condições ambientais
ρ_{ws}	Massa volúmica do vapor de água puro em condições normalizadas
ρ	Coefficiente de correlação
σ	Desvio padrão

Símbolo	Significado e contexto de aplicação
σ_s	Secção transversão de dispersão
σ_x, σ_y	Desvios padrão associados a função de ajuste gaussiana bidimensional
σ_0^2	Variância <i>a priori</i>
τ	Transmitância
$\phi_B(X)$	Operação morfológica de fecho com elemento estruturante B no conjunto binário X
ω, φ, κ	Ângulos de rotação de Euler
ω_0	Frequência natural
∞	Infinito
$^\circ$	Grau (unidade de ângulo plano)
$^\circ\text{C}$	Grau Celsius (unidade de temperatura)

VI. ÍNDICE DE SIGLAS E ACRÓNIMOS

AC	Antes de Cristo
ACM	Association for Computing Machinery
AIP	American Institute of Physics
ASCE	American Society of Civil Engineers
BIPM	Bureau Internationale des Poids e Mèures
BMP	Bitmap
CCD	Charged Coupled Device
CGPM	Conférence Générale des Poids et Mèures
CIC	Centro de Instrumentação Científica
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage
CIPM	Comité International des Poids et Mèures
CIRP	College International pour la Recherche en Productique
CMM	Coordinate Measuring Machine
CMC	Cadeias de Markov Monte Carlo
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
COSMO	Constellation of small Satellites for the Mediterranean basin Observation
CP	Comboios de Portugal
CVPR	Computer Vision and Pattern Recognition
DE	Departamento de Estruturas
DG	Digital Globe
DGPS	Differential Global Position System
DIC	Digital Image Correlation
DLT	Direct Linear Transform
DMD	Digital micro Mirror Devices
DN	Digital Number
DPEA	Desvio Padrão Experimental da Amostra
DPIV	Digital Particle Image Velocimetry
DOE	Diffraction Optical Element
EA	European co-operation for Accreditation
EADS	European Aeronautic Defence and Space company
EMVA	European Machine Vision Association
EN	European standard
ENGA	Encontro Nacional de Geodesia Aplicada
ENVISAT	Environmental Satellite
ERS	European Remote Sensing

ESA	European Space Agency
EUA	Estados Unidos da América
EURAMET	European Association of National Metrology Institutes
FCT	Fundação para a Ciência e a Tecnologia
FCTUC	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
FCTUNL	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
FCUL	Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FIG	Fédération Internationale des Géomètres
FOV	Field Of View
FSO	Free-Space Optics
GIF	Graphics Interchange Format
GLONASS	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikoraya Sistema
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPS	Global Positioning System
GPT	Gabinete da Ponte sobre o Tejo
GSD	Ground Sample Distance
GUM	Guide to the expression of Uncertainty in Measurement
ICM	Instrumentação Científica e Metrologia
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFCC	International Federation of Clinical Chemistry
IFOV	Instantaneous Field Of View
ILAC	International Laboratory Accreditation Cooperation
IMEKO	International Measurement Confederation
IMU	Inertial Measurement Unit
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
IP	International Protection marking
IPAC	Instituto Português de Acreditação
IPQ	Instituto Português da Qualidade
IRE	Institute of Radio Engineers
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System
ISBN	International Standard Book Number
ISO	International Organization for Standardization
ISPRS	International Society for Photogrammetry and Remote Sensing
IST	Instituto Superior Técnico
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry

IUPAP	International Union of Pure and Applied Physics
IV	Infravermelho
JCGM	Joint Committee for Guides in Metrology
JPEG	Joint Photographic Experts Group
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LDV	Laser Doppler Velocimetry
LED	Light Emitting Diode
LFJ	Large Flat Jack
LIDAR	Light Detection And Ranging
LMC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LMC-EM	Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Ensaios e Metrologia
LNM	Laboratórios Nacionais de Metrologia
LPI	Lei de Propagação de Incertezas
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MDT	Modelo Digital do Terreno
MMC	Método de Monte Carlo
MMC 3D	Máquina de Medição de Coordenadas tridimensionais
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
MOP	Ministério das Obras Públicas
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDT&E	Nondestructive Testing and Evaluation
NMI	National Metrology Institute
NOE	Núcleo de Observação de Estruturas
NP	Norma Portuguesa
NPL	National Physical Laboratory
NTC	Negative Temperature Coefficient
OIML	Organisation Internationale de Métrologie Légale
OSA	Optical Society of America
PC	Policarbonato
PCMCIA	Personal Computer Memory Card International Association
PDGPS	Precise Differential Global Position System
PIV	Particle Image Velocimetry
PNG	Portable Networks Graphics
PRN	Pseudo Random Noise
P25A	Ponte 25 de Abril
RADAR	Radio Detection And Ranging
RAR	Real Aperture Radar

RGB	Red Green Blue
RSB	Regulamento de Segurança de Barragens
RTK	Real Time Kinematics
RU	Reino Unido
SAR	Syntethic Aperture Radar
SFJ	Small Flat Jack
SGI	Sistema de Gestão de Infraestruturas
SHM	Structural Health Monitoring
SI	Sistema Internacional (de Unidades)
SIAM	Society for Industrial and Applied Mathematics
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SPIE	International Society for Optics and Photonics
SPOT	Satellite Pour l’Observation de la Terre
STT	Strain Tensor Tube
SVD	Singular Value Decomposition
TIFF	Tagged Image File Format
TLS	Terrestrial Laser Scanning
TOF	Time Of Flight
TRL	Technology Readiness Level
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UMA	Unidade de Metrologia Aplicada
URSI	Union Radio Scientifique Internationale
USB	Universal Serial Bus
UTC	Universal Time Coordinated / Universel Temps Coordonné
UTL	Universidade Técnica de Lisboa
UUV	Unmanned Underwater Vehicle
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional

VII. AGRADECIMENTOS

O autor deseja expressar o seu agradecimento a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a elaboração desta tese de doutoramento, e em particular:

- aos orientadores científicos, **Professor Doutor José Manuel Rebordão**, Investigador Coordenador e Subdiretor da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, e **Doutor Álvaro Silva Ribeiro**, Investigador Auxiliar do Laboratório Nacional de Engenharia Civil e chefe do Núcleo de Qualidade Metrológica, pelo acompanhamento, motivação e atenção disponibilizada apesar das permanentes e exigentes solicitações profissionais a que estiveram sujeitos ao longo da realização deste trabalho;
- ao **Conselho Diretivo do Laboratório Nacional de Engenharia Civil**, nomeadamente, ao seu Presidente, **Engenheiro Carlos Pina**, pela longa confiança manifestada e pela oportunidade de formação científica e técnica do autor neste Laboratório de Estado;
- à **Fundação para a Ciência e a Tecnologia**, pelo financiamento concedido através da atribuição de Bolsa de Investigação ao autor, sem a qual não seria possível concretizar esta tese de doutoramento;
- à **Infraestruturas de Portugal**, pela autorização e apoio prestados na realização de atividade experimental na Ponte 25 de Abril, em particular, aos **Engenheiros Santinho Horta, Fernanda dos Santos, Pedro Abegão, Pedro Galriça**, e ao **Senhor Júlio Vaz** pelo acompanhamento permanente;
- aos **Engenheiros Carlos Oliveira Costa**, Diretor do Centro de Instrumentação Científica do LNEC e ao seu antecessor, **Francisco Carvalhal**, pelo seu empenho na criação de condições favoráveis e disponibilidade de recursos necessários à formação do autor enquanto investigador científico;
- ao **Engenheiro Manuel Pimenta de Castro**, Investigador Coordenador (aposentado) e antigo chefe do Núcleo de Qualidade Metrológica do Centro de Instrumentação Científica do LNEC, pelo seu esforço visionário na criação de uma escola de conhecimento científico e técnico de Metrologia no LNEC e pela constante motivação que incutiu ao autor;
- ao **Engenheiro Carlos Almeida Santos**, Investigador Auxiliar do Centro de Instrumentação Científica do LNEC, cujo trabalho doutoral constituiu o ponto de partida desta tese, tendo facilitado a compreensão do problema estudado, e também pela permanente disponibilidade em responder às dúvidas do autor e pelo apoio prestado no projeto e desenvolvimento da componente eletrotécnica do sistema de medição;
- ao **Engenheiro Paulo Morais**, Investigador Auxiliar do Centro de Instrumentação Científica do LNEC, pelo apoio dado na vertente mecânica do projeto e produção do sistema de medição desenvolvido e pelo conhecimento transmitido sobre o cenário de observação estudado;

- ao **Engenheiro João Palma**, Investigador Principal do Centro de Instrumentação Científica do LNEC, pelo recorrente espírito crítico face às abordagens estudadas e às soluções desenvolvidas, que em muito enriqueceram este trabalho;
- aos colegas do Núcleo de Qualidade Metrológica do Centro de Instrumentação Científica do LNEC, **Abel Virgílio, Alexandre Pinheiro, António Pais, Catarina Martins, João Fernandes e Ricardo Mendes**, por todo o apoio prestado na realização da atividade experimental, sobretudo, pelas repetidas e exigentes idas à Ponte 25 de Abril;
- aos colegas do Laboratório de Óptica, Lasers e Sistemas da FCUL, nomeadamente, ao **Doutor Manuel Abreu** e ao **Fernando Monteiro**, pelos seus contributos na montagem óptica para ensaio geométrico da câmara;
- aos colegas do Núcleo de Sistemas Eletrotécnicos e Mecânicos do Centro de Instrumentação Científica do LNEC, **Hugo Borges, Inês Ascensão e João Paixão**, pela sua colaboração e rigor profissional na produção da componente eletrotécnica do sistema de medição;
- ao pessoal técnico do **Instituto de Soldadura e Qualidade** e da **Koch Engineering & Construction** do estaleiro de manutenção da Ponte 25 de Abril, pelo acompanhamento e apoio prestados nos ensaios de campo;
- à **5ª Comunidade Neocatecumenal da Paróquia da Sagrada Família do Calhariz de Benfica**, que apoiou espiritualmente o autor e com a qual partilhou os sucessos e dificuldades encontradas ao longo deste percurso;
- ao meu sogro, **Engenheiro Pedro Romana Ribeiro**, pela transmissão do seu conhecimento e experiência profissional no âmbito da inspeção e observação de pontes e viadutos, e à minha sogra **Madalena**, pelo seu fantástico *cheesecake*, no qual o autor afogou muitas das suas frustrações ao longo deste doutoramento;
- aos meus pais, **Fernando e Lina**, que o autor recorda com saudade e que sempre o ajudaram e motivaram na realização dos seus estudos académicos;
- à minha esposa **Mariana** e aos nossos **filhos**, pela alegria concedida ao autor no seu regresso a casa após um longo dia de trabalho, aos quais o autor pede perdão pelas ausências frequentes;
- a **Deus**, pelo seu infinito amor e misericórdia manifestados no Seu Filho **Jesus Cristo**, pedra angular nesta e noutras etapas da vida do autor, e pelo seu **Espírito Santo**, que tantas vezes se manifestou ao longo desta caminhada em direção a Ele, com a fiel intercessão de **Maria** nossa mãe celeste e do seu esposo **José**.

Lisboa, 22 de dezembro de 2015

VIII. PUBLICAÇÕES

No âmbito dos estudos de doutoramento realizados foram efetuadas as seguintes publicações:

- **artigos em revistas científicas**

- Lages Martins, L., Rebordão, J. M., Silva Ribeiro, A. (2015) – Intrinsic Parameterization of Computational Optical System for Long-Distance Displacement Structural Monitoring, *Optical Engineering*, vol. 54, n.º 1, pp. 014105-1–014105-13, SPIE Digital Library, DOI 10.1117/1.OE54.1.014105, ISSN 0091-3286;
- Lages Martins, L., Rebordão, J. M., Silva Ribeiro, A. (2014) – Thermal Influence on Long-Distance Optical Measurement of Suspension Bridge Displacement, *International Journal of Thermophysics*, vol. 35, n.º 3 e 4, Springer Science+Business Media, New York, pp. 693-711, DOI 10.1007/s10765-014-1607-3, ISSN 0195-928X;
- Lages Martins, L., Rebordão, J. M., Silva Ribeiro, A. (2014) – Qualidade Metrológica da Medição Óptica de Deslocamento de Ponte Suspensa de Elevada Dimensão, *Medições e Ensaios*, vol. 1, n.º 8 e 9, Sociedade Portuguesa de Metrologia (SPMet), pp. 42-54, ISSN 2182-5424;
- Lages Martins, L., Rebordão, J. M., Silva Ribeiro, A. (2013) – Metrologia Óptica Aplicada à Segurança Estrutural de Pontes Suspensas, *Medições e Ensaios*, vol. 1, n.º 6, Sociedade Portuguesa de Metrologia (SPMet), pp. 3-15, ISSN 2182-5424;

- **artigos em livros**

- Lages Martins, L., Rebordão, J. M., Silva Ribeiro, A. (2015) – Calibration Analysis of a Computational Optical System Applied in the Dimensional Monitoring of a Suspension Bridge, *Advanced Mathematical and Computational Tools for Metrology and Testing X*, eds. Pavese, F., Bremser, W., Chunovkina, A. G., Fhischer, N., Forbes, A. B., Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences, vol. 86, World Scientific, Singapura, pp. 265-272, ISBN 978-4678-61-2, ISBN 978-981-4678-62-9 (e-book);

- **comunicações em conferências e congressos internacionais**

- Lages Martins, L., Rebordão, J. M., Silva Ribeiro, A. (2015) – Dimensional Field Testing of an Optical Measurement System in a Long-Span Suspension Bridge, *Proceedings of SPIE*, vol. 9525, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IX, 95252D, eds. Lehmann, P. H., Osten, W., Albertazzi, A., SPIE Digital Library, DOI 10.1117/12.2182830, ISBN 9781628416855;

- Lages Martins, L., Rebordão, J. M., Silva Ribeiro, A. (2015) – Structural Observation of a Long-Span Suspension Bridge for Safety Assessment: Implementation of an Optical Displacement Measurement System, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 588, 012004, IOP Publishing, DOI 10.1088/1742-6596/588/1/012004, ISSN 1742-6596;
- Lages Martins, L., Rebordão, J. M., Silva Ribeiro, A. (2014) – Optical Metrology Applied to 3D Displacement Measurement of Long-Span Suspension Bridge Dynamics, *Proceedings of EUROLYN 2014 – 9th International Conference on Structural Dynamics*, eds. Cunha, A., Caetano, E., Müller, G., pp. 2135-2142, ISSN 2311-9020, ISBN 978-982-752-165-4;
- Lages Martins, L., Rebordão, J. M., Silva Ribeiro, A. (2013) – Conception and Development of an Optical Methodology Applied to Long-Distance Measurement of Suspension Bridges Dynamic Displacement, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 459, 012055, IOP Publishing, DOI 10.1088/1742-6596/459/1/012055, ISSN 1742-6596;
- Lages Martins, L., Rebordão, J. M., Silva Ribeiro, A. (2013) – Optical Measurement System Applied to Continuous Displacement Monitoring of Long-Span Suspension Bridges, *Proceedings of SPIE*, vol. 8788, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VIII, 87882M, eds. Lehmann, P. H., Osten, W., Albertazzi, A., SPIE Digital Library, DOI 10.1117/12.2019996, ISBN 9780819496041.

*À minha esposa Mariana,
aos nossos filhos
e aos meus pais e sogros*

Leitor, sê benévolo, considera a minha intenção e não me combatas com aspereza. As coisas úteis atribui-as a Deus; se encontrares algumas inutilidades, será por me ter eu equivocado ou por tu não me compreenderes. Corrige-me com amabilidade.

SÃO RAIMUNDO DE PENAFORTE (1175 – 1275)

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

As estruturas terrestres com elevada dimensão constituem elementos fundamentais para o progresso contemporâneo da Sociedade, assumindo um papel relevante nas redes de transporte rodoviário e ferroviário (pontes, viadutos, entre outras), na exploração de recursos naturais e produção de energia (barragens, estruturas marítimas e hidráulicas) e na edificação urbana. Neste tipo de grandes obras, um eventual cenário de falha estrutural em qualquer fase da sua vida útil (que, em regra, se prolonga no tempo durante várias décadas) está associado a relevantes consequências humanas e económicas, pelo que a garantia da sua segurança constitui um requisito obrigatório para as respetivas entidades gestoras.

Neste âmbito, a observação de grandes obras contribui decisivamente para a deteção atempada de danos e melhoria do conhecimento do seu estado e consequentemente para a sua segurança, sendo suportada em atividades de inspeção visual, ensaios não-destrutivos e instrumentação pontual ou permanente visando a medição de grandezas em diferentes domínios (massa, comprimento, termometria, vibrações, caudal, entre outros), associadas quer às ações (tráfego, escoamentos hidráulicos e aerodinâmicos, condições ambientais e atividade sísmica) quer à sua resposta estrutural da obra. Em virtude da elevada perturbação ambiental característica dos meios em que se insere, a medição de grandezas em grandes obras constitui um desafio instrumental, nomeadamente, no que diz respeito à medição de deslocamento em que a instrumentação convencional (medição por contacto, nivelamento hidrostático, fio de prumo, medição geodésica ou fotogramétrica) se mostra inadequada pela falta de pontos absolutos de referência na proximidade da região de interesse e pela reduzida exatidão dimensional em regime dinâmico.

A medição dimensional por via óptica apresenta um elevado potencial para a resolução adequada do problema de medição descrito anteriormente, em comparação com outras soluções emergentes suportadas em sistemas GNSS – *Global Navigation Satellite Systems*, e em sistemas do tipo radar interferométrico com micro-ondas, nos quais o nível de exatidão dimensional é severamente afetado pelo efeito multirreflexão do sinal eletromagnético nos elementos metálicos que compõem a

estrutura observada, como é o caso das vigas de rigidez associadas às pontes suspensas de elevada dimensão.

Os sistemas ópticos permitem ultrapassar esta limitação, reunindo as mesmas vantagens das restantes soluções emergentes – medição sem contacto, não-invasiva, realizada a longa distância, em tempo real e de forma contínua a curto, médio e longo prazo – a que se adiciona a capacidade para medição de deslocamento tridimensional numa gama de medição elevada, por vezes, superior a um metro em infraestruturas com elevado grau de flexibilidade. Contudo, importa salientar a sua vulnerabilidade operacional em caso de observação na presença de nevoeiro ou chuva intensa, onde o fenómeno da atenuação atmosférica pode ter um efeito adverso na visualização de alvos de interesse.

Em acréscimo a esta motivação para o recurso a sistemas ópticos menciona-se a recente evolução da qualidade de fontes emissoras e respetivos processos de caracterização metrológica (nos LEDs, por exemplo), de recursos computacionais e de métodos experimentais para a caracterização de câmaras digitais com elevada distância focal, aspeto essencial para a concretização de medições dimensionais a longa distância com sensibilidade e rigor adequados. Refere-se, igualmente, a crescente facilidade de acesso comercial a componentes ópticos e eletrónicos do tipo *off-the-shelf* na concretização de soluções de medição óptica que, pela sua variabilidade, exigem a definição de métodos de caracterização metrológica que possibilitem um julgamento adequado da sua utilização, tendo em conta os requisitos de medição e de segurança estabelecidos para um determinado cenário de observação dimensional dinâmica de uma infraestrutura.

Atualmente, os sistemas ópticos possuem uma significativa presença na atividade de observação espacial, aérea ou terrestre com interesse para a aplicação em Engenharia Civil, bem como, para o problema genérico da medição dimensional dinâmica a longa distância (entre 100 m e 1000 m) em tempo real. Neste âmbito, nota-se a ausência de resposta e de complementaridade nos campos tradicionais de atuação da Visão Computacional – medição em tempo real a curta distância – e da Fotogrametria – medição não-contínua em distâncias de observação inferiores a 100 m (na Fotogrametria Terrestre) ou superiores a 1000 m (na Fotogrametria Aérea).

Nos anos mais recentes, o desenvolvimento de sistemas ópticos tem procurado dar resposta a necessidades neste domínio de medição dimensional, contudo, na ausência de um enquadramento metrológico apropriado com uma visão probabilística da medição que fundamente a qualidade da medição pretendida – rastreabilidade ao Sistema Internacional (SI) de Unidades e a correspondente avaliação de incertezas de medição. Este último aspeto é considerado essencial para a quantificação (robusta) do nível de exatidão dimensional obtido neste tipo de sistemas de medição e para a concretização de uma comparação confiável com: (i) outras soluções de medição de natureza similar (óptica) ou distinta; (ii) requisitos de medição em obra; (iii) registos históricos de dados recolhidos.

De facto, só recentemente surgiram na Metrologia, os recursos e as ferramentas computacionais, nomeadamente, por simulação de Monte Carlo, requeridas para o cálculo de incertezas de medição em problemas complexos, de natureza não-linear e multivariável, como é o caso em estudo, permitindo a identificação de fontes de incerteza dominantes nas quais se devem concentrar os esforços de melhoria do desempenho metrológico no projeto, concretização e manutenção dos sistemas ópticos desenvolvidos.

1.2 Objetivos

A presente tese de doutoramento teve como objetivos principais:

- (i) o desenvolvimento de metodologia óptica – configuração singular com câmara móvel – para medição dimensional de infraestruturas dinâmicas a longa distância (entre 100 m e 1000 m) com carácter inovador relativamente às abordagens ópticas exploradas neste contexto da Engenharia Civil no que respeita à simplicidade da configuração geométrica dos seus componentes (câmara e alvos, do tipo *off-the-shelf*), assegurando um grau satisfatório de sensibilidade e exatidão da medição pretendida;
- (ii) o estudo do impacto dos fenómenos atmosféricos de atenuação, refração e turbulência atmosférica na qualidade da medição dimensional pretendida e o desenvolvimento e a validação experimental de métodos que permitam quantificar os efeitos sistemáticos e aleatórios daí decorrentes de forma a efetuar a sua correção e contabilização na incerteza de medição;

- (iii) o enquadramento metrológico do sistema de medição desenvolvido, nomeadamente: o estabelecimento da sua rastreabilidade ao SI de Unidades mediante calibração com recurso a protótipo experimental de padrão de referência; a avaliação da incerteza de medição enquanto elemento constituinte do resultado da medição e indicador da qualidade de medição; a definição de métodos de parametrização e de caracterização metrológica de câmaras e alvos que compõem o sistema;
- (iv) a concretização experimental do método de medição num cenário real de observação dimensional terrestre de uma ponte suspensa com elevada dimensão – a Ponte 25 de Abril (P25A), em Lisboa – de modo a efetuar a medição do deslocamento dinâmico do seu $\frac{1}{2}$ vão principal com uma distância de observação próxima de 500 m;
- (v) a evolução do conhecimento científico associado à linha estratégica de investigação e desenvolvimento do LNEC no que respeita à aplicação de meios ópticos na observação dimensional terrestre de infraestruturas dinâmicas, estabelecendo os fundamentos teóricos e os métodos experimentais validados necessários a uma análise fundamentada e rigorosa da sua adequação e viabilidade enquanto elemento integrante do plano de instrumentação de uma grande obra.

1.3 Fases de desenvolvimento

Na presente tese de doutoramento são identificadas quatro fases de desenvolvimento consecutivas: (i) caracterização do problema de medição; (ii) projeto e desenvolvimento da solução de medição; (iii) análise experimental da solução concretizada; (iv) discussão e divulgação científica do estudo efetuado.

A primeira fase foi iniciada com a análise crítica das soluções de medição referidas na literatura para o problema da medição dimensional a longa distância de infraestruturas dinâmicas, cuja análise abrangeu instrumentos e sistema de medição convencionais e emergentes. Neste último caso, foi dada particular atenção aos sistemas ópticos, tendo-se efetuado a sua comparação com outros sistemas de medição emergentes (GNSS e radar interferométrico com micro-ondas), e com sistemas de natureza óptica similar, designadamente, abordagens de configuração

singular ou múltipla. Esta análise evidenciou a abordagem óptica de configuração singular de câmara móvel como a solução mais promissora e atrativa para a resolução do problema em causa, tendo-se promovido uma análise suportada na sua estruturação modelar e a respetiva modelação matemática nas vertentes dimensional e geométrica.

Por sua vez, na fase de projeto e desenvolvimento, efetuou-se o dimensionamento do sistema de medição aplicado ao cenário de observação da P25A de modo a efetuar a medição do deslocamento dinâmico do seu $\frac{1}{2}$ vão principal. A concretização deste sistema de medição foi antecipadamente validada incluindo o respetivo suporte computacional, designadamente, as suas tarefas de processamento digital de imagem e cálculo do valor lido de deslocamento envolvendo um processo de otimização não-linear multivariável.

Nesta fase foram igualmente estabelecidos: (i) o método de parametrização intrínseca pelo método DOE – *Diffraction Optical Element* e respetivos algoritmos de processamento de imagem e cálculo de estimativas de parâmetros intrínsecos essenciais para a concretização da abordagem óptica proposta; (ii) o método de medição direta das distribuições verticais da temperatura e humidade relativa nos locais de instalação dos principais elementos do sistema de medição (câmara e alvos) e respetiva modelação do índice de refração do ar húmido e do efeito sistemático de desvio por refração vertical; (iii) o método de avaliação do efeito de feixe errante por motivo de turbulência atmosférica decorrente de gradiente térmico vertical no trajeto óptico; (iv) o método de calibração *in situ* do sistema de medição, onde se inclui o projeto e a caracterização do protótipo experimental de padrão de referência requerido para este efeito.

A fase de análise experimental da solução, concretizada em cenário de observação da P25A, incluiu a discussão dos resultados obtidos em ensaios laboratoriais de natureza dimensional do referencial de medição e do protótipo de padrão de referência e de natureza geométrica da câmara, bem como dos resultados de ensaios de campo na P25A, onde se destacam: (i) os ensaios termohigrométricos visando a quantificação dos gradientes verticais em regiões críticas para o sistema de medição; (ii) a avaliação da qualidade de imagem dos alvos produzida a longa distância; (iii) a observação do efeito de feixe errante por motivo de turbulência atmosférica, decorrente de gradiente térmico vertical; (iv) a calibração *in situ* do sistema de medição com recurso ao protótipo de padrão de referência desenvolvido; e

(v) a medição do deslocamento dinâmico do $\frac{1}{2}$ vão principal da P25A em diferentes situações operacionais. As estimativas e incertezas de medição obtidas nesta fase motivaram uma melhoria de aspetos cruciais para a solução desenvolvida, nomeadamente, no que se refere à qualidade da imagem dos alvos, com impacto relevante na estimativa do nível de exatidão da medição dinâmica de deslocamento.

Por último, na fase de discussão e divulgação do estudo efetuado inclui-se a atividade de elaboração de documentação em comunicações a eventos científicos nacionais e internacionais e, também, em artigos em revistas nacionais e internacionais com arbitragem científica. Esta fase culminou com a geração da presente tese de doutoramento.

1.4 Organização

Neste sub-capítulo é promovida uma descrição sumária do conteúdo de cada um dos cinco capítulos que compõe a tese de doutoramento.

No presente capítulo é realizada uma breve exposição relativa ao enquadramento temático da tese, bem como dos objetivos estabelecidos no âmbito da sua elaboração promovendo-se, igualmente, a descrição das suas fases de desenvolvimento e da sua organização.

O Capítulo 2 apresenta o estado dos conhecimentos em Metrologia Óptica de Visão Computacional e da Observação Dimensional Terrestre de Infraestruturas. Na primeira área temática referida, pretende-se definir, inicialmente, o seu âmbito de atuação, enquadramento e evolução histórica e, posteriormente, dar destaque ao seu potencial para aplicação em problemas de observação em Engenharia Civil. Na segunda área temática mencionada, procura-se evidenciar como a atividade de observação terrestre de infraestruturas é relevante para a sua caracterização dimensional sendo apresentadas, em detalhe, as soluções de medição dimensional convencionais e emergentes disponíveis para esse efeito, efetuando-se a sua análise comparativa. Tratando-se de duas áreas temáticas com fases de maturação distintas, pretende-se que este capítulo ilustre a ligação que o estudo desenvolvido concretizou entre ambas.

No Capítulo 3 é apresentada a abordagem óptica desenvolvida para medição dimensional de infraestruturas dinâmicas incluindo os elementos cruciais para o

dimensionamento do respetivo sistema de medição. Faz-se igualmente referência aos processos de aquisição e processamento digital de imagens dos alvos constituintes do sistema de medição e são mencionados os aspetos essenciais associados à modelação geométrica da câmara digital. Neste capítulo, é também discutida a influência do meio de propagação, nomeadamente, o impacto dos fenómenos atmosféricos de atenuação, refração e turbulência que afetam negativamente o desempenho do sistema de medição desenvolvido. O Capítulo 3 contém, também, uma descrição global das atividades experimentais requeridas para a caracterização metrológica e o estabelecimento de rastreabilidade do sistema de medição no contexto do SI de Unidades. É apresentado o método de calibração dimensional proposto para o sistema de medição desenvolvido, onde se inclui a respetiva cadeia de rastreabilidade metrológica.

O Capítulo 4 é dedicado à concretização experimental da abordagem óptica proposta para a observação dimensional dinâmica de grandes obras (no caso estudado, uma ponte suspensa – a P25A – com vão principal de elevada dimensão, próximo de 1000 m). Para além da descrição detalhada do referido cenário de observação e do sistema óptico aplicado, são apresentadas as atividades experimentais relacionadas com a parametrização intrínseca da câmara aplicada nesse contexto e com o estudo da influência térmica do meio de propagação e o seu impacto nos fenómenos atmosféricos da refração e turbulência, nomeadamente, em diferentes épocas do ano. É discutida a rastreabilidade dimensional ao SI de Unidades no que se refere aos ensaios de caracterização metrológica do referencial de medição e do protótipo experimental de padrão de referência desenvolvido para calibração do sistema de medição, cuja descrição e análise de resultados constam, também, neste capítulo. Por último, é efetuada a avaliação das incertezas de medição associadas aos desvios de calibração obtidos e são discutidos os resultados de campanhas de medição dinâmica de deslocamento no $\frac{1}{2}$ vão principal da P25A em diferentes situações operacionais, designadamente, na ausência e na presença de tráfego ferroviário.

Finalmente, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões obtidas no âmbito do estudo efetuado, sendo mencionadas as linhas de desenvolvimento futuro do método e sistema de medição descritos, nomeadamente, no que se refere às atividades necessárias à evolução do presente grau de maturidade para aplicação generalizada em cenários de observação dimensional permanente de infraestruturas dinâmicas.

Em acréscimo, este documento possui um conjunto de anexos com informação detalhada de interesse para algumas das temáticas desenvolvidas que, pela sua dimensão, não foram apresentadas nos capítulos supracitados procurando-se, deste modo, complementar a compreensão das matérias discutidas.

2. ESTADO DOS CONHECIMENTOS

2.1 Introdução

Este Capítulo tem por objetivo a descrição do estado dos conhecimentos de duas áreas temáticas – a Metrologia Óptica de Visão Computacional e a Observação Dimensional Terrestre de Infraestruturas – nas quais se enquadra a presente tese de doutoramento e cuja concretização pretende promover uma ligação benéfica entre ambas, visando o acréscimo de conhecimento e a identificação de potenciais soluções ópticas inovadoras para a medição dimensional terrestre de infraestruturas dinâmicas.

Numa fase inicial (sub-capítulo 2.2) é efetuado o enquadramento e a definição da *Metrologia Óptica de Visão Computacional* partindo da existência de uma área de interesse comum entre a Metrologia Óptica e a Visão Computacional no contexto estudado. Atendendo à evolução diferenciada destes dois domínios científicos, segue-se uma clarificação do respetivo âmbito de intervenção e atividades desenvolvidas, bem como da nomenclatura e conceitos metrológicos adotados no estudo subsequente. Em seguida, é apresentada, de forma sumária, a evolução histórica da Óptica, da Fotogrametria, da Visão Computacional e da Metrologia e as suas contribuições para que a medição óptica com suporte computacional seja atualmente considerada como uma solução emergente e potencialmente adequada à resolução de problemas de medição complexos. Neste âmbito refere-se a atividade de observação espacial, aérea e terrestre realizada no contexto da Engenharia Civil com vários exemplos ilustrativos.

O caso particular da observação dimensional terrestre de infraestruturas é desenvolvido numa fase posterior (sub-capítulo 2.3), efetuando-se o seu enquadramento na Engenharia Civil e mencionando os aspetos associados a grandes obras como são as barragens de betão, as pontes e os viadutos (mensurandas, locais de medição, ensaios realizados) que asseguram a caracterização dimensional do seu comportamento estrutural. São igualmente apresentados os métodos, instrumentos e sistemas de medição dimensional convencionais e emergentes utilizados nesse âmbito, sendo aprofundado o estado do conhecimento no que se refere à medição óptica.

As considerações finais (sub-capítulo 2.4) promovem uma análise comparativa do conjunto de soluções estudadas, suportada no estabelecimento de um conjunto de requisitos e especificações de medição alvo, que justificou o interesse no estudo metodológico de abordagens ópticas para a observação dimensional dinâmica de grandes obras em Engenharia Civil.

2.2 Metrologia óptica de visão computacional

2.2.1 Definição, âmbito e enquadramento

A Metrologia Óptica constitui uma área científica particular da Metrologia, definida como *ciência da medição e suas aplicações* [VIM (2012)], na qual os processos experimentais de medição são suportados na luz que, por sua vez, constitui a temática fundamental de estudo da Óptica enquanto ramo científico da Física. A sua atividade abrange três vertentes principais – Fundamental, Aplicada e Legal – independentemente do grau de exatidão que a caracteriza. A Metrologia Óptica intervém transversalmente em múltiplos domínios das Ciências e Engenharias, promovendo a melhoria dos processos de medição suportados em métodos e sistemas ópticos, permitindo avaliar os seus limites e aprofundar as suas capacidades tendo em vista o aperfeiçoamento do conhecimento dos fenómenos estudados.

Neste âmbito, destaca-se a identificação e o estudo de elementos de influência que determinam a qualidade da medição óptica pretendida, no que se designa por *caraterização metrológica*. No contexto da Metrologia Óptica e tendo em conta a definição genérica apresentada por [Rabinovich (2000)], a *caraterização metrológica* constitui uma atividade crucial para o julgamento da adequação do processo de medição (óptica) na obtenção do valor da mensuranda e da estimativa da sua inexactidão, contribuindo para a avaliação da sua qualidade, ou seja, para a determinação do grau de cumprimento face aos requisitos de gama de medição e nível de exatidão estabelecidos pelo utilizador da medição.

Seguindo o atual enquadramento probabilístico da Medição, compete à Metrologia Óptica a avaliação rigorosa e fundamentada da *incerteza de medição* – parâmetro não-negativo que caracteriza a dispersão dos valores da grandeza que são atribuídos à mensuranda [VIM (2012)] – associada a um determinado processo de

medição óptica, quantificando o grau de exatidão das estimativas obtidas. Em acréscimo, a quantificação das diferentes componentes individuais de incerteza de medição que contribuem para a dispersão final de valores da grandeza, permite hierarquizar as prioridades de intervenção no processo de medição tendo em vista a sua mitigação e consequente melhoria de exatidão.

Este aspeto é particularmente relevante no contexto da aplicação de soluções ópticas para a resolução de problemas de medição, visto que avalia e quantifica as diferenças existentes entre os modelos conceptual e real do método e sistema de medição, podendo acompanhar a sua evolução deste do estágio inicial de conceção, modelação e desenvolvimento até ao estágio final de concretização e manutenção em cenário de medição.

É igualmente importante referir o papel que a Metrologia Óptica tem na atribuição de *rastreabilidade* às medições de natureza óptica aos diferentes domínios metrológicos do SI de Unidades, estabelecendo uma base comparativa essencial para a avaliação de múltiplas soluções, quer ao nível de soluções de natureza óptica, quer entre soluções ópticas e outras de natureza distinta, para a resolução de problemas de medição.

Neste contexto, a Metrologia Óptica intervém estabelecendo métodos e desenvolvendo meios experimentais, designadamente, padrões de referência necessários à *calibração* de instrumentos e de sistemas ópticos, entendida como a operação em que se promove a sua comparação com padrões de qualidade metrológica superior, por sua vez, rastreados ao padrão primário de realização fundamental da grandeza em questão. Esta integração dos instrumentos e sistemas de medição óptica em cadeias internacionais de rastreabilidade ao SI e a consequente avaliação da sua exatidão e desempenho metrológico, permite que se adquira confiança na sua utilização e se conheça a sua fiabilidade na realização de medições em contextos operacionais complexos, por vezes, caracterizados por uma elevada perturbação de natureza ambiental.

O atual desenvolvimento tecnológico dos meios computacionais criou condições para que o elemento computacional adquirisse, também, um papel determinante na criação de um novo domínio de atividade no contexto da Metrologia Óptica – a

Metrologia Óptica de Visão Computacional¹ – que tem por objetivo o estudo aprofundado dos processos de medição suportados na formação e no processamento digital de imagens obtidas em sistemas de visão. Esta atividade é caracterizada pela capacidade de deteção e registo, sem contacto físico com o objeto e num reduzido intervalo de tempo, de uma elevada quantidade de informação de natureza diversificada (dimensional, geométrica, radiométrica, fotométrica, colorimétrica, térmica, entre outras) sendo possível ultrapassar as limitações inerentes à visão humana, tornando possível a visualização de informação impercetível ao Homem melhorando, conseqüentemente, o conhecimento deste tipo de fenómenos.

Salienta-se que a Metrologia Óptica de Visão Computacional centra o seu interesse em informação visual dos objetos observados que suporte a realização de medições. Excluem-se, deste modo, as atividades diversificadas de deteção, identificação, determinação de relacionamentos mútuos e interação com os objetos observados, inseridas no domínio geral da Visão Computacional².

Atualmente assiste-se a uma relação de benefício mútuo entre a Metrologia Óptica e a Visão Computacional. Por um lado, a Metrologia Óptica beneficia das ferramentas computacionais de processamento digital de imagem desenvolvidas no contexto da Visão Computacional para a mitigação de componentes de incerteza de natureza numérica. Por sua vez, a Visão Computacional passa a dispor de conhecimento e meios experimentais essenciais para a garantia de confiança nas medições efetuadas em determinados contextos operacionais. Neste sentido, importa promover a disseminação de conceitos metrológicos relevantes, referidos anteriormente – caracterização metrológica, rastreabilidade, calibração e incerteza de medição, entre outros – junto da comunidade

¹ São também frequentes as designações alternativas de *Metrologia Óptica Assistida por Computador* e *Metrologia de Visão*.

² Neste tipo de atividades encontram-se vastas aplicações distribuídas pelas áreas da Biométrica (controlo de acesso e investigação forense), da Segurança (deteção de intrusos, análise de tráfego e alertas de emergência), dos Transportes e Comunicações (deteção de obstáculos, condução automática, leitura de endereços postais), do Cinema (efeitos especiais e animação computacional), da Medicina (diagnóstico, caracterização e monitorização de patologias), do Comércio (reconhecimento de objetos) e da Indústria (inspeção de componentes e robótica) [Szeliski (2011)].

científica associada à Visão Computacional para que se consolidem princípios de medição metrologicamente estruturados.

Embora o presente estudo esteja centrado na medição dimensional, a Metrologia Óptica abrange, igualmente, outros domínios metrológicos, nomeadamente, da temperatura e das grandezas mecânicas e químicas. No contexto da medição óptica dimensional é possível encontrar aplicações diversificadas ao nível da Engenharia de Produção, Engenharia Civil, Geodesia, Deteção Remota e da Astronomia, distribuídas por diferentes intervalos de medição de interesse, que vão desde a magnitude nanométrica até à dimensional de corpos celestes e distâncias espaciais. Os princípios de medição que suportam as medições ópticas dimensionais nos contextos mencionados anteriormente podem ser genericamente agrupados em três categorias [Schwenke (2002)]:

(i) Óptica Geométrica – associada aos fenómenos de refração, reflexão e propagação linear da luz que são a base funcional de inúmeros instrumentos e sistemas de medição onde se identificam elementos ópticos como fontes de luz (lâmpadas, díodos, lasers), lentes, diafragmas, espelhos, prismas, divisores de feixe, filtros e componentes optoeletrónicos (por exemplo, fotodíodos, CCDs – *Charged Coupled Devices*, DMDs – *Digital micro Mirror Devices*);

(ii) Óptica Ondulatória – onde se explora a natureza ondulatória da luz, nomeadamente, a sobreposição de ondas de radiação eletromagnética com comprimento de onda similar ou idêntico e que está presente num vasto conjunto de instrumentos e sistemas de medição que recorrem, por exemplo, a elementos ópticos polarizadores, holográficos e redes de difração;

(iii) Óptica Quântica – que suporta o processo de geração de feixes laser enquanto fonte coerente de radiação monocromática de elevada intensidade e cujos efeitos são contabilizados em medições dimensionais de microscopia de varrimento e interferometria sub-nanométrica.

A evolução tecnológica³ decorrida nestas áreas da Metrologia Óptica Dimensional, potenciada pelos recentes desenvolvimentos da capacidade dos meios computacionais e dos componentes optoeletrónicos, suporta atualmente um conjunto diversificado de medições no domínio do comprimento, conforme se expõe no Quadro 2.1 [Schwenke (2002)].

Quadro 2.1: Medição óptica de grandezas no domínio do comprimento.

Grandeza	Método ou instrumento de medição óptica
Comprimento	Encoder linear com escala óptica graduada, interferómetro (convencional, multicomprimento de onda ou laser díodo), sensor de triangulação, sensor de autofocagem, laser de femtosegundos, holografia conoscópica
Ângulo	Encoder óptico, autocolimador, interferómetro diferencial, giroscópio laser
Retilismo	Método de inclinação com autocolimador, sistema laser com sensor CCD, interferómetro laser
Medição superficial	Interferometria de franjas, microscopia óptica confocal, interferometria de luz branca, holografia, microscopia óptica de varrimento de campo próximo
Coordenadas espaciais e grandezas geométricas	Máquinas de medição de coordenadas multisensor, fotogrametria e sistemas de projeção de franjas, multilateração, laser μ -GPS, tomografia de raio X

A motivação para a realização deste tipo de medições ópticas reside na capacidade de aquisição de uma elevada quantidade de informação de natureza dimensional num reduzido intervalo de tempo, na ausência de contacto e com elevada exatidão, de uma forma robusta e frequentemente automatizada. Estes elementos tornam atrativa a sua aplicação no contexto da observação dimensional terrestre de infraestruturas dinâmicas, conforme se discutirá no presente capítulo.

A secção seguinte (2.2.2) promove a descrição dos principais eventos históricos que conduziram ao atual estado do conhecimento em Metrologia Óptica de Visão Computacional. Por sua vez, na secção 2.2.3 são referidas as principais aplicações de medição óptica com recurso a imagens digitais encontradas no âmbito da Engenharia

³ Nesta evolução é possível destacar como principais marcos tecnológicos: no contexto da Óptica Geométrica, a invenção do microscópio por Leeuwenhoek em 1660; o interferómetro de Michelson em 1892, no âmbito da Óptica Ondulatória; e o aparecimento do laser em 1960 em resultado da exploração do comportamento quântico da luz por parte de Maiman.

Civil, onde se insere a temática de medição estudada na presente tese – a observação terrestre de estruturas dinâmicas com elevada dimensão.

2.2.2 Evolução histórica

A presente secção pretende expor a convergência temporal histórica dos contributos científicos e técnicos provenientes de áreas distintas de estudo da Óptica, da Fotogrametria, da Visão Computacional e da Metrologia que, embora desfasados no tempo, tiveram um papel relevante para o atual estado do conhecimento em Metrologia Óptica de Visão Computacional.

A Óptica constitui um dos ramos científicos mais antigos da Física cuja origem remonta à Antiguidade, atribuindo-se os primeiros elementos ópticos conhecidos à civilização egípcia datados de 1900 AC [Hecht (1991)]. Na consequente evolução histórica da Óptica, importa destacar o aparecimento da câmara escura que constitui um sistema de visão primitivo das atuais câmaras de aquisição digital de imagens que, na sua versão inicial, correspondia a um quarto sem iluminação com uma pequena abertura numa das paredes que permitia a entrada de luz direcionada para um alvo interior, onde formava uma imagem invertida da cena exterior.

Este tipo de dispositivo óptico é mencionado nos estudos realizados na Antiguidade grega por Aristóteles (384-322 AC), tendo a sua aplicação se propagado no tempo, sendo posteriormente referido nos trabalhos de observação celeste do árabe Alhazen (950-1040) durante a Idade Média. Na sua divulgação pela Europa Renascentista destacam-se os nomes de Leonardo da Vinci (1452-1519), Giovanni della Porta (1535-1615) e Johannes Kepler (1571-1630). No fim do século XVIII, a câmara escura é um dispositivo óptico bastante conhecido, tendo evoluído para dimensões reduzidas que permitiram assegurar a sua portabilidade [Hecht (1991)] beneficiando, igualmente, da evolução técnica dos processos de produção de lentes e do desenvolvimento dos fundamentos matemáticos associados aos modelos geométricos de projeção, nomeadamente, dos trabalhos realizados por Heinrich Lambert (1728-1777).

Embora fosse conhecido o efeito de escurecimento de saís de prata sob ação da luz do sol desde a Idade Média, só no século XIX surge a capacidade técnica de registo da imagem formada numa câmara escura. Atribuí-se ao francês Joseph Nicéphore Niépce

(1765-1833) a primeira fotografia em 1826, composta por papel com tratamento de cloreto de prata e obtida por exposição a raios de luz e utilizando ácido nítrico para fixação da imagem formada no interior de uma câmara escura, que assim adquire a designação de máquina ou câmara fotográfica. O desenvolvimento técnico da fotografia iniciado por Niépce é continuado pelo seu sócio Louis Daguerre (1787-1851) que promove a sua divulgação pelo meio científico, nomeadamente, na Academia de Ciências francesa [Sutton (2009)].

Entre a segunda metade do século XIX e o início do século XX, ocorrem constantes inovações das câmaras fotográficas, onde se destaca: em 1850, Legray e Archer introduzem a capacidade de produção de fotografias no local de aquisição de imagem; em 1870, Maddox cria o processo fotográfico sem necessidade de revelação imediata; em 1889, Eastmann introduz o filme fotográfico; em 1895, surge a câmara cinematográfica com os irmãos Lumière, pioneiros do cinema; e em 1908, torna-se possível a aquisição de fotografias com cores.

Este desenvolvimento tecnológico das câmaras fotográficas suscita o aparecimento contemporâneo da Fotogrametria⁴, por volta de 1860, com a atividade de determinação de características dimensionais de património arquitetónico conduzida por Aimé Laussedat e Meydenbauer [Stirling (2001)]. Até ao final do século XIX, este método de medição passa a ser utilizado para efeito de levantamento topográfico de cadeias montanhosas e glaciares estando, no entanto, associado a cálculos matemáticos de geometria projetiva e de visão de perspetiva complexos e morosos.

No início do século XX, a Fotogrametria evolui de um estágio primitivo para a Fotogrametria Analógica, com o aparecimento de equipamentos de análise de fotografias (o estereocomparador em 1901 e o estereotraçador em 1908) que visam a simplificação do processo fotogramétrico. Por altura da 1ª Guerra Mundial (1914-1918), assiste-se a um acentuado desenvolvimento dos meios computacionais analógicos de natureza mecânica que, combinados com a aquisição de fotografias aéreas, motivam o crescimento da atividade fotogramétrica dedicada à produção cartográfica.

⁴ Termo que reúne as palavras gregas *phōs* ou *photós* (luz), *grámma* (inscrição) e *métron* (medida).

Em 1924, Otto von Gruber estabelece as equações projetivas e respectivas fórmulas diferenciais para sistemas de visão estereoscópica dando início à Fotogrametria Analítica. Mais tarde (por volta dos anos 50 do século XX), Earl Church contribui para o desenvolvimento da Fotogrametria mediante a definição de soluções analíticas para as equações fotogramétricas e Hellmut Schmid introduz a notação matricial atualmente aplicada nas abordagens fotogramétricas multiestação e estuda a propagação de erros no contexto da aplicação do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ).

Nos anos de 1920, o advento da televisão associado aos trabalhos de Baird, Farnsworth e Zworykin, potencia o desenvolvimento da Optoeletrônica, nomeadamente, de equipamentos com capacidade de detecção e conversão de imagens ópticas em sinais elétricos, suscitando o aparecimento de câmaras de vídeo do tipo tubular. Desde os anos 1930 até meados dos anos 1980, são desenvolvidos múltiplas câmaras tubulares, designadamente, as câmaras *vidicon*⁵ em 1951 [Gåsvik (1995)], cujo princípio de funcionamento suportou o desenvolvimento de outras câmaras de vídeo até meados dos anos 1980.

Nas décadas de 60 e 70 do século XX, surgem os primeiros desenvolvimentos dos métodos para registo digital de imagens e dos algoritmos de processamento e análise, visando a automatização do processo de extração de informação útil. Nesta época, a investigação científica visando a aplicação de sistemas digitais de visão em Engenharia é reduzida, estando concentrada nas seguintes temáticas: (i) no reconhecimento de caracteres e na integração da imagem digital como componente de perceção visual integrante de sistemas de inteligência artificial em Robótica; (ii) na Visão Computacional, no estabelecimento de processos de recuperação da estrutura

⁵ As câmaras *vidicon* eram compostas por um tubo de vidro em vácuo, possuindo numa extremidade um canhão de eletrões e, na extremidade oposta, um alvo formado por uma janela de vidro, um filme metálico transparente e um material semiconductor fotocondutivo. Em redor do tubo existiam enrolamentos elétricos para focagem e orientação do feixe de eletrões proveniente do canhão com o qual se promovia o varrimento do alvo, originando uma corrente elétrica proporcional à intensidade da luz incidente, a qual era posteriormente utilizada na geração eletrónica do sinal de vídeo [Gåsvik (1995)].

tridimensional do mundo a partir de imagens visando a compreensão do cenário observado em aplicações de microscopia, radiologia e medicina [Szeliski (2011)].

Nos anos 1980, as câmaras CCD começaram a substituir a maioria das câmaras *vidicon* nos diversos contextos onde estavam presentes em virtude das seguintes vantagens: (i) apresentam menores sinais residuais na ausência de luz; (ii) possuem melhor relação sinal-ruído, o que se reflete na qualidade das imagens obtidas; (iii) a inexistência de tubo e respetivos enrolamentos traduz-se numa diminuição acentuada da dimensão, do peso e do consumo elétrico da câmara de vídeo; (iv) maior rapidez do processo de aquisição de imagem.

Na mesma época, os meios computacionais aumentam a sua capacidade de processamento, o que, aliado à capacidade de criação de imagens digitais através de processos de digitalização de fotografias analógicas ou recurso a câmaras digitais, motivam o desenvolvimento dos métodos, técnicas e algoritmos de processamento digital dedicados a operações computacionais⁶.

Dentro da Visão Computacional importa destacar os trabalhos realizados em processamento digital de imagens por correlação (DIC – *Digital Image Correlation*), onde se promove a medição de grandezas dimensionais, geométricas e dinâmicas (velocidade e aceleração) mediante recurso à técnica de *template matching*. Este tipo de abordagem é caracterizado pela procura, numa sub-região de uma imagem, de objetos semelhantes a um objeto-modelo (linhas, grelhas, pontos, vetores aleatórios, entre outros elementos geométricos) com recurso a operadores de correlação [Sutton (2009)]. Os objetos modelo podem estar contidos em superfícies sólidas ou constituírem partículas num fluido, sendo possível, no final do processo de análise, realizar medições em toda a extensão do objeto.

Desde o início dos anos 1980 até à atualidade é possível reconhecer duas grandes áreas de aplicação do processamento digital de imagem por correlação: (i) na caracterização mecânica de materiais complexos (metálicos, poliméricos, cerâmicos, compósitos, betão, entre outros), em particular, no estudo de fenómenos de fratura, onde

⁶ Operações aritméticas, estatísticas, relacionais, geométricas, morfológicas, de realce, processos de reamostragem, técnicas de segmentação e filtragem, entre outros.

tem assegurado a medição de grandezas como deslocamento ou deformação, rotação, tensão e extensão; (ii) na determinação de campos de velocidade em escoamentos de fluidos, no que hoje se designa por DPIV – *Digital Particle Image Velocimetry*. Com o crescente desenvolvimento computacional, as medições evoluíram de um nível planar (bidimensional) para um nível volumétrico (tridimensional) em ambas as áreas mencionadas anteriormente.

À semelhança da Óptica, as raízes históricas da Metrologia remontam igualmente à Antiguidade, sabendo-se da utilização de instrumentos de medição de massa, comprimento, volume e tempo na vida quotidiana e, até mesmo, de padrões rudimentares visando a regulamentação financeira e económica das relações comerciais das suas sociedades. Desde então, a unificação e harmonização das unidades de medição apenas foi alcançada por breves períodos de tempo e restringida a reduzidas áreas geográficas de influência. A época do Renascimento marca o início de uma nova fase de desenvolvimento e disseminação de instrumentos de medição, combinando a aplicação no contexto económico com o desenvolvimento tecnológico e científico que caracteriza este período referindo-se, como exemplo, o duplo impacto dos instrumentos de navegação marítima no estabelecimento de novas rotas comerciais internacionais e no suporte de estudos científicos aplicados na investigação de fenómenos físicos em diversos domínios.

O século XIX foi particularmente rico na conceção e concretização de instrumentos de medição científica que permitiram desenvolver e fundamentar as teorias científicas emergentes. Por esta altura, consolida-se na Europa o desejo de harmonizar os padrões com a intenção, introduzida em França no final do século XVIII, de se constituírem padrões universais apoiados em princípios físicos invariantes e reconhecidos a nível internacional. O desenvolvimento dos estudos para a definição do metro como *a décima milionésima parte do meridiano terrestre*, associando-se a esta medição um artefacto padrão, conduziu a que fosse estabelecido, em 20 de maio de 1875, o Tratado da Convenção do Metro (da qual Portugal foi um dos 17 signatários), visando a criação e manutenção de um sistema internacional de unidades e da definição de padrões fundamentais das suas grandezas de base. A adoção deste Tratado constituiu o ponto de partida para a criação do SI de Unidades, cuja designação foi formalizada em 1960, e que

atualmente engloba sete grandezas de base⁷ e cujas unidades são definidas com base na materialização de padrões ou na concretização experimental de fenómenos físicos.

A estrutura organizacional do SI [Howarth (2008)] inclui: (i) a CGPM – *Conférence Générale des Poids et Mèbres*, que reúne os representantes dos países signatários da Convenção do Metro e que aprova os desenvolvimentos no âmbito da Metrologia fundamental que suportam o SI; (ii) o CIPM – *Comité Internationale des Poids et Mèbres*, composto por um número limitado de representantes da CGPM, que coopera com outras organizações mundiais de Metrologia (OIML, ISO, IEC, IFCC, IUPAC, entre outras) e que supervisiona o BIPM – *Bureau Internationale des Poids et Mèbres* e designa os dirigentes das Comissões Consultivas em diversos domínios. Compete ao BIPM a atividade de investigação científica de unidades físicas e padrões fundamentais e a realização de ensaios de comparação entre laboratórios nacionais primários (NMIs – *National Metrology Institutes*).

Hoje, entende-se que a Metrologia enquanto Ciência da Medição abrange três vertentes igualmente importantes, a *fundamental*, associada ao desenvolvimento e manutenção de padrões associados às grandezas fundamentais com o mais elevado nível de exatidão; a *aplicada*, associada à avaliação do desempenho dos instrumentos de medição em ambiente laboratorial e industrial, onde contribui para o aperfeiçoamento de processos, aumento de confiança em produtos e serviços e melhoria do desempenho das entidades; e a *legal*, assegurando a verificação das medições com impacto nas transações económicas, na saúde e na segurança.

A presente tese de doutoramento enquadra-se na vertente de Metrologia aplicada, sendo os estudos apresentados orientados para a conceção, caracterização e desenvolvimento de métodos, padrões e instrumentos de medição, assegurando a sua rastreabilidade ao SI mediante a calibração refletida na melhoria da qualidade metrológica das cadeias de medição. De facto, as últimas três décadas marcam uma profunda evolução do conceito de *medição*, nomeadamente, no que diz respeito à

⁷ Comprimento, massa, tempo, intensidade de corrente elétrica, temperatura termodinâmica, quantidade de matéria e intensidade luminosa cujas unidades de base são, respetivamente, o metro (m), o quilograma (kg), o segundo (s), o ampere (A), o kelvin (K), a mole (mol) e a candela (cd).

reformulação dos fundamentos que a suportam. Neste período assistiu-se a uma transição de uma perspetiva clássica da medição, de natureza determinística centrada no conceito de *erro de medição*, para uma perspetiva contemporânea da medição, de natureza aleatória, fundamentada no conceito de *incerteza de medição* e tendo por base a Teoria das Probabilidades e a Estatística. Na nova abordagem, o erro de medição é enquadrado num plano meramente conceptual enquanto que a incerteza de medição desempenha a função de estimador que permite a quantificação do nível de exatidão da medição.

Esta abordagem probabilística da medição surge em finais dos anos 70 do século XX motivada pela introdução de um novo postulado (da incerteza) no formalismo da medição por Leaning e Finkelstein [Leaning (1979)], sem no entanto existir nessa época, uma tradução prática de como aplicar este novo conceito, nem de métodos simples para concretizar a sua quantificação. Face a esta situação, o CIPM solicitou ao BIPM a elaboração de uma recomendação [Giacomo (1980)] relativa a esta matéria, concluída em 1980 e posteriormente aceite [Giacomo (1981)] e reavaliada [Giacomo (1986)] pelo CIPM.

O documento produzido pela comissão de peritos, entretanto criada, distingue dois tipos de incertezas de medição, refletindo diferentes perspetivas probabilísticas: a *perspetiva frequencista* (tipo A), segundo a qual as incertezas de medição são avaliadas de acordo com métodos estatísticos e obtidas mediante a realização experimental de um conjunto de observações; e a *perspetiva bayesiana* (tipo B), na qual a formulação das incertezas de medição decorre do conhecimento prévio.

Esta classificação serviu de base para a elaboração do *Guide to the expression of Uncertainty in Measurement* (GUM) [GUM (1993)], documento publicado em 1993⁸ por várias entidades lideradas nesse processo pela *International Organization for Standardization* (ISO), visando a definição de um entendimento coerente e unificador relativamente à matéria de cálculo e expressão de incertezas de medição. O método de cálculo aí exposto, designado por *Lei de Propagação de Incertezas*, é baseado na expansão em série de Taylor (de 1ª ou 2ª ordem), permitindo obter soluções exatas no que respeita aos modelos matemáticos lineares representativos do processo de medição

⁸ Em 1995, o GUM foi novamente reimpresso visando a introdução de pequenas correções.

coabrindo, deste modo, uma parte substancial das aplicações metrológicas para as quais não existia uma base de suporte à avaliação de incertezas de medição.

O GUM é, desde essa época, um documento de referência para as entidades ligadas à Qualidade, Normalização e Acreditação de laboratórios dedicados à atividade de calibração e ensaio [EA 4/02 (1999)] [NP EN ISO/IEC 17025 (2005)]. A crescente disseminação dos Sistemas da Gestão da Qualidade tem contribuído de forma decisiva para a sua grande difusão. Porém, rapidamente se constataram as limitações da sua aplicação a problemas metrológicos complexos⁹ motivando, desde os finais dos anos 90 do século XX, o desenvolvimento de linhas de investigação visando encontrar soluções satisfatórias para estes problemas. Neste âmbito, é referido o exemplo pioneiro do LNEC na realização de estudos de avaliação de incertezas ao nível da termometria fundamental [Ribeiro (2009)] e em problemas de medição aplicada em Engenharia Civil [Ribeiro (2006)].

Uma dessas linhas consiste no estudo de propagação de incertezas de medição mediante o recurso ao Método de Monte Carlo (MMC). No fim dos anos 1990, a utilização generalizada deste método na simulação de processos de natureza aleatória, em diversos domínios da Física, tinha permitido ultrapassar diversas limitações impostas pelo recurso a abordagens analíticas convencionais. Neste contexto científico, a aplicabilidade limitada do método GUM dinamizou o estudo de métodos alternativos considerados mais adequados [Weise (1997)] [Siebert (1999)]. O MMC adquiriu notoriedade por se entender que traduzia os efeitos de fenómenos aleatórios característicos do processo de medição sem os constrangimentos do GUM.

Os estudos entretanto desenvolvidos¹⁰ culminaram, em 2008, na publicação do Suplemento 1 do GUM [S1-GUM (2008)] elaborado pelo JCGM – *Joint Committee for Guides in Metrology*¹¹, no qual é definido um enquadramento do MMC no contexto

⁹ Por exemplo, na determinação de incertezas de medição de grandezas obtidas indiretamente por via computacional em Metrologia dimensional e geométrica [Balsamo (1999)], [Schwenke (2000)].

¹⁰ Por exemplo, [Cox (2000)] [Kracker (2003)] [Cox (2004)] [Cox (2006-a)].

¹¹ Reúne as sete entidades internacionais (BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP e a OIML) responsáveis pela elaboração do GUM, bem como do próprio Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM). Em 1998, a ILAC – *International Laboratory Accreditation Cooperation* juntou-se a este grupo.

alargado de determinação de incertezas de medição em sistemas de medição lineares e não-lineares, sendo apresentados os fundamentos básicos necessários à sua concretização. A abordagem exposta apresenta aspetos inovadores que traduzem uma maior proximidade relativamente à realidade física de muitos problemas metrológicos, nomeadamente, a atribuição de funções densidade de probabilidade assimétricas a determinadas grandezas de entrada, o conhecimento da distribuição de probabilidade da grandeza de saída e a obtenção de soluções que convergem para a solução exata no caso de modelos matemáticos não-lineares.

No seguimento da publicação deste primeiro suplemento do GUM surge, em 2011, um segundo suplemento [S2-GUM (2011)] dedicado ao cálculo de incertezas de medição para sistemas de medição com múltiplas grandezas de saída. Em breve, prevê-se a publicação, por parte do JCGM, de um terceiro suplemento ao GUM dedicado à modelação na medição e um guia relativo à aplicação do MMQ.

Atualmente, as principais linhas de investigação metrológica no âmbito da incerteza de medição centram-se no recurso a abordagens alternativas que contabilizam o conhecimento prévio existente acerca da realidade física do problema de medição impedindo, por exemplo, que o intervalo de expansão da incerteza de medição de uma grandeza apresente valores fisicamente impossíveis [Cox (2006-b)]. Neste âmbito destacam-se as abordagens suportadas no Princípio da Máxima Entropia [Shannon (1948)], [Jaynes (1957)] e na Inferência Bayesiana [Weise (1992)] [Lira (2002)]. A concretização de qualquer destas abordagens requer, na maioria dos casos, a realização de simulação numérica recorrendo a métodos matemáticos avançados como as Cadeias de Markov Monte Carlo (CMMC).

2.2.3 Aplicação na observação em Engenharia Civil

2.2.3.1 Observação espacial e aérea

Esta secção pretende descrever, de forma sumária, um conjunto de aplicações de sistemas ópticos de visão computacional no âmbito da atividade de observação espacial e aérea com impacto no domínio da Engenharia Civil.

A observação espacial suportada em sistemas ópticos equipados com sensores pancromáticos e multiespectrais integrados em satélites de Detecção Remota é cada vez mais frequente no contexto da Engenharia Civil, atendendo ao crescente acesso a coleções temporais e espaciais de imagens digitais da superfície terrestre e à melhoria significativa da sua resolução espacial. Atualmente, as referidas imagens têm uma origem diversificada, conforme se observa no Quadro 2.2 (informação compilada de [DG (2014)], [EADS (2014)], [NASA (2014)]), que expõe o conjunto de satélites de observação espacial¹² recorrentes na obtenção de imagens ópticas no domínio da Detecção Remota.

A aplicação de observação aérea no domínio da Engenharia Civil centra-se, sobretudo, na atividade fotogramétrica realizada a partir de aeronaves tendo a vista a produção de informação geográfica a incluir em carta topográfica ou em sistema de informação geográfica (SIG), nomeadamente, através de ortofotos¹³ e modelos tridimensionais (realistas ou gráficos) representativos de uma região da superfície terrestre, nos quais se pode incluir informação de natureza distinta da geográfica, melhorando a capacidade de análise do fenómeno estudado.

¹² Para além de sistemas ópticos pancromáticos e multiespectrais, os satélites de observação espacial podem incluir instrumentação complementar, nomeadamente, sistemas InSAR – *Interferometric Synthetic Aperture Radar* (como nos satélites ERS-1/2, ENVISAT, TerraSAR-X e COSMO Sky-Med) que fornecem informação altimétrica relevante, por exemplo, para a medição a longo prazo de deformação vertical de reduzida amplitude em infraestruturas (subsistência em estruturas marítimas e pontes) [Sousa (2012)].

¹³ As ortofotos constituem projeções ortogonais da superfície terrestre nas quais todos os elementos aí expostos se encontram à mesma escala mediante correção digital por processamento de imagem (ortorretificação) visando eliminar deformações geométricas resultantes do efeito de perspetiva, altitude e velocidade da aeronave.

Quadro 2.2: Satélites de observação espacial com maior utilização em Detecção Remota.

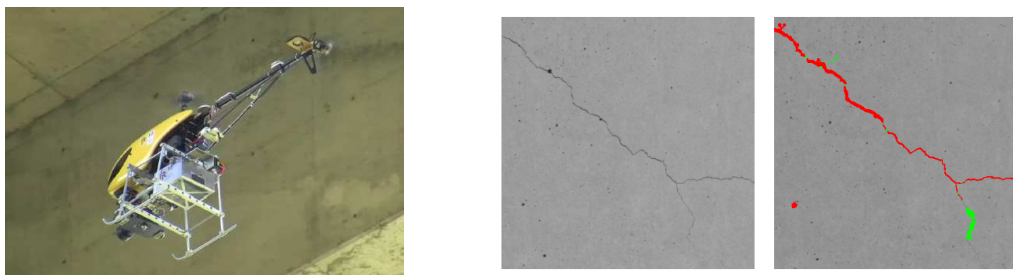
Designação	Operador	Período de funcionamento	Resolução espacial de imagens pancromáticas	Resolução espacial de imagens multiespectrais
SPOT 1	EADS	1986-1990	10 m	20 m
SPOT 2		1990-2009		
SPOT 3		1993-1997		
SPOT 4		1998-2013		
Landsat 7	NASA	1999-...	15 m	30 m
Ikonos	DG	1999-...	1 m	4 m
QuickBird		2001-...	0,6 m	2,4 m
SPOT 5	EADS	2002-...	2,5 m	10 m
WorldView 1	DG	2007-...	0,5 m	
WorldView 2		2009-...	0,46 m	1,84 m
SPOT 6	EADS	2012-...	1,5 m	8 m
Landsat 8	NASA	2013-...	15 m	30 m
SPOT 7	EADS	2014-...	1,5 m	8 m

Este tipo de observação é suportado em sistemas ópticos com sensores pancromáticos e multiespectrais montados em plataformas giroestabilizadas em aviões ou helicópteros, sendo a georreferenciação das imagens adquiridas obtida por: (i) via indireta, com recurso a apoio geodésico no terreno visando o conhecimento de pontos fotogramétricos; (ii) via semidireta, mediante a utilização de sistema de posicionamento GNSS instalado na aeronave; (iii) via direta, com a utilização conjunta de sistema de posicionamento GNSS e de orientação por sistema IMU – *Inertial Measurement Unit*.

Para além das aplicações de natureza geográfica referidas para a fotogrametria aérea, as imagens digitais obtidas por observação espacial e aérea podem ser utilizadas em conjunto com informação altimétrica obtida por via de sistemas InSAR e LIDAR, no estudo da evolução temporal do tecido urbano, florestal, redes de transporte e zonas costeiras [Gonçalves (2011)] na gestão e ordenamento territorial, tornando possível a análise de regiões territoriais passíveis de ocorrência de cheias [Roque (2012)] ou de subsidência [Redwiek (2011)], mediante processamento digital adequado (redução de ruído, ortorretificação, normalização, segmentação e classificação). A nível computacional, este tipo de informação é útil na criação de modelos digitais do terreno (MDTs) contribuindo, igualmente, para a parametrização e validação de modelos

computacionais dedicados à simulação de fenômenos de interesse (geológicos, hidráulicos, entre outros).

Faz-se também referência aos sistemas ópticos instalados em meios aéreos do tipo UAV – *Unmanned Aerial Vehicle*, visando auxiliar a inspeção visual exterior de grandes obras (*vide* Figuras 2.1 e 2.2) [Santos (2013)], permitindo obter imagens digitais cujo processamento computacional contribui para a detecção e o mapeamento automático de patologias (fissuras, infiltrações, entre outras) e acompanhar a sua evolução temporal. Neste contexto, os principais desafios operacionais passam pela melhoria da qualidade das imagens (associada à estabilidade dinâmica do voo aéreo) e pela existência de veículos com capacidade de carga necessária ao transporte de sistemas ópticos de visão computacional adequados à observação pretendida [Rito (2013)].



Figuras 2.1 e 2.2: Inspeção visual com UAV (à esq.) e processamento digital de imagem de uma superfície de betão com fissura (à dir.).

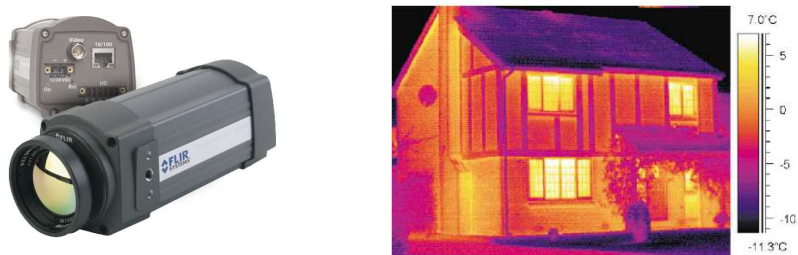
2.2.3.2 Observação terrestre

Atualmente, os sistemas ópticos apresentam uma aplicação crescente na observação terrestre de fenômenos de interesse para a Engenharia Civil, encontrando-se presente sobretudo ao nível da atividade de inspeção visual e de experimentação em ambiente laboratorial e em obra, onde a aquisição e o processamento digital de imagem suportam diversas medições realizadas nos domínios metrológicos da temperatura, caudal, vibrações e comprimento.

No contexto da atividade de inspeção visual, destaca-se a utilização de sistemas ópticos no âmbito de obras geotécnicas, onde a aquisição periódica de imagens e o consequente processamento e análise permitem assinalar deslocamentos significativos em

encostas. Salienta-se, igualmente, a atividade de deteção e acompanhamento de patologias (por exemplo, fissuras, depósitos, fugas e erosão) em obra, nomeadamente, em barragens de betão, edifícios, pontes e viadutos, onde se inclui a observação subaquática realizada com recurso a mergulhadores ou UUV – *Unmanned Underwater Vehicle*. Destaca-se, em particular, a capacidade do processamento digital destas imagens para a produção de mosaicos e ortofotos das obras observadas e a deteção automática de patologias.

Recentemente, tornou-se comum o recurso a sistemas ópticos em termometria, com a designação de câmaras termográficas ou câmara de infravermelhos, em virtude da sua elevada sensibilidade espectral na respetiva gama de comprimento de onda¹⁴. Este tipo de sistemas ópticos assegura a formação de imagens do cenário observado tendo em conta a radiação infravermelha emitida pelos objetos visualizados, a qual apresenta uma relação direta com a temperatura da sua superfície. A sua aplicação no contexto da Engenharia Civil está centrada na atividade de inspeção e ensaio não-destrutivo, onde contribui para a deteção de anomalias (fendas, delaminação, infiltrações, humidade, entre outras), por exemplo, em pontes de betão e alvenaria, pavimentos rodoviários e aeroportuários e no estudo do comportamento térmico de edifícios para habitação (*vide* Figuras 2.3 e 2.4) [FLIR (2014)], [Clark (2003)].



Figuras 2.3 e 2.4: Câmara termográfica (à esq.) e visão térmica da superfície exterior de uma habitação (à dir.).

¹⁴ Na gama de comprimento de onda da radiação infravermelha, compreendida entre 0,75 μm e 100 μm , é possível distinguir as seguintes categorias: infravermelho próximo (0,75 μm a 3 μm); infravermelho médio (3 μm a 6 μm); infravermelho longo (6 μm a 15 μm); infravermelho extremo (15 μm a 100 μm).

No contexto da observação em campo tem particular interesse o recurso a câmaras termográficas com sensibilidade espectral elevada no infravermelho longínquo e extremo, que permitem uma discriminação elevada em cenários de reduzida variabilidade térmica espacial.

A radiação infravermelha detetada pelo sensor da câmara suporta a realização de medições de temperatura da superfície dos objetos, tendo em conta a Lei de Stefan-Boltzmann, que relaciona a densidade de fluxo radiante com a temperatura mediante o conhecimento da emissividade do objeto. Comparativamente com outros métodos de medição de temperatura, nomeadamente, por contacto, a medição térmica com recurso a câmaras termográficas apresenta um nível de exatidão inferior em virtude da: (i) absorção atmosférica da radiação infravermelha entre o objeto e a câmara, sobretudo, em longas distâncias de observação; (ii) radiação proveniente de elementos próximos ao objeto de interesse; (iii) instabilidade térmica por transferência de calor por condução e convecção; (iv) alteração da emissividade do objeto.

Com efeito, a extração de informação quantitativa de natureza térmica a partir das imagens recolhidas deve ser realizada com precaução, preferencialmente, em ambiente radiante conhecido, embora se reconheçam diversas vantagens neste método de medição térmica, designadamente: ausência de contacto; observação a longa distância em regime diurno e noturno e na presença de fumo ou neblina; visão global da distribuição espacial da temperatura do objeto; intervalo de medição compreendido entre -20 °C a 1600 °C, dependendo do tipo do sensor e do filtro aplicados na câmara termográfica; e resposta adequada à observação dinâmica.

No domínio metrológico do caudal, os sistemas ópticos apresentam uma crescente utilização na medição de campos bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D) de velocidade instantânea de fluidos, área com particular interesse para a Engenharia Civil, nomeadamente, na atividade de investigação associada a estudos experimentais de modelos físicos reduzidos de natureza hidráulica (escoamentos em portos, estruturas marítimas, zonas costeiras e de estuário, estruturas e escoamentos fluviais) ou associados à aerodinâmica das construções.

Este tipo de medição óptica apresenta a designação genérica de PIV – *Particle Image Velocimetry*, visto ser suportado na adição de partículas (de vidro ou material polimérico, flocos de alumínio ou gotas de óleo) de dimensão reduzida ao fluido iluminado de forma artificial e cujo movimento se assume ser idêntico ao escoamento¹⁵. No método de medição PIV 2D é promovida a aquisição de duas imagens da região iluminada num reduzido intervalo de tempo (em regra, inferior a 1 μ s) mediante recurso a uma câmara digital com elevado número de píxeis [Kiger (2010)]. Conforme ilustrado na Figura 2.5 [Kiger (2010)], cada imagem é dividida em janelas ou regiões de reduzida dimensão, nas quais se assume que a velocidade é constante, efetuando-se a determinação do deslocamento com base no recurso a processamento por técnicas de autocorrelação e correlação cruzada aplicadas às distribuições de intensidade obtidas para cada janela.

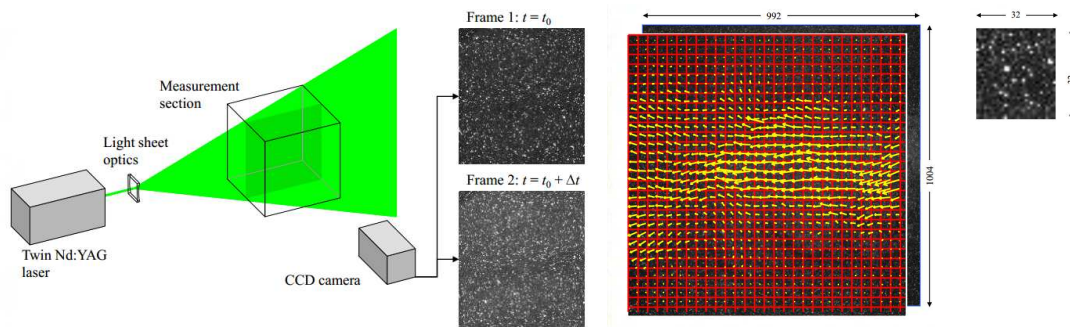


Figura 2.5: Representação do processo de medição óptica PIV.

Para além da câmara digital, a concretização deste processo de medição implica o recurso a laser e elementos ópticos para a iluminação transversal do fluido relativamente à direção de observação, conjugado com um sincronizador que promova a ativação simultânea dos dispositivos de iluminação e aquisição de imagem e efetue a medição do intervalo de tempo entre aquisição de imagens, visando a determinação da velocidade em cada janela da imagem. Atualmente, este tipo de sistema de medição integra aplicações computacionais dedicadas ao processamento de imagem e ao cálculo do campo de

¹⁵ Para tal, é comum recorrer a partículas esféricas com massa volúmica similar à do fluido mas com índice de refração distinto de modo a facilitar a sua visualização. O diâmetro das partículas deverá ser o menor possível para garantir um seguimento adequado do fluido mas, ao mesmo tempo, suficientemente elevado para originar a reflexão e dispersão da luz incidente (entre 10 μ m e 100 μ m). Note-se que o processo de introdução das partículas no fluido não deverá introduzir perturbações no seu escoamento.

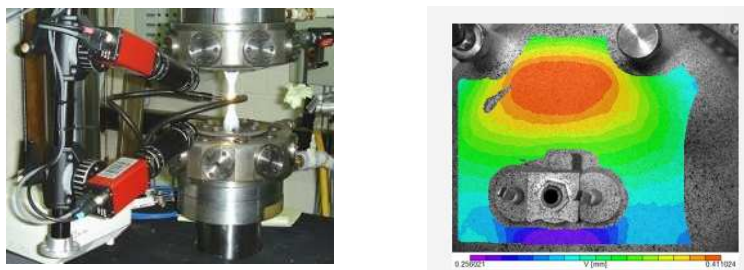
velocidade observado. Para a medição de campos tridimensionais de velocidade por PIV recorre-se a sistema estereoscópico composto por duas câmaras digitais com orientações distintas observando o plano iluminado no fluido.

Comparativamente com outros métodos convencionais de medição de velocidade de escoamentos, nomeadamente, anemometria de fio quente e LDV – *Laser Doppler Velocimetry*, que apenas permitem a medição invasiva e pontual da velocidade, a medição óptica por PIV apresenta a vantagem de permitir conhecer o campo de velocidade 2D e 3D do escoamento do fluido de forma não-intrusiva.

De forma similar à medição PIV em fluidos, o processamento digital de imagem por correlação pode ser aplicado a elementos sólidos mediante aplicação (por colagem, pintura ou projeção) de malhas de pontos distribuídos de forma aleatória sobre a superfície (planar ou curva) sujeita a observação ou recorrendo a características dimensionais e geométricas próprias do elemento. Este tipo de medição apresenta uma aplicação crescente ao nível do estudo de materiais e componentes estruturais com interesse para a Engenharia Civil, permitindo determinar o deslocamento, a rotação ou a extensão em regiões de interesse desses elementos nos regimes estático e dinâmico, suportando a análise da sua resposta estrutural a solicitações de natureza mecânica e térmica [Sutton (2009)], em regra, em ambiente laboratorial. Como exemplo refiram-se as medições dimensionais obtidas numa base temporal que permitem promover a identificação modal de vibrações ou, quando conjugadas com o conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais, asseguram a determinação de tensões aplicadas ou residuais [Baldi (2013)]. Este tipo de medição constitui uma alternativa complementar à extensometria elétrica, onde apenas é possível promover medições pontuais numa determinada região e em materiais com elasticidade reduzida.

Em regra, a medição óptica por correlação de imagem, quer em PIV quer na observação de elementos sólidos, recorre a sistema estereoscópico composto por câmaras digitais com elevado número de píxeis associadas a iluminação constante ou estroboscópica, cuja parametrização intrínseca (distância focal, coordenadas de ponto principal, coeficientes de distorção, entre outros) e extrínseca (posição e orientação das câmaras) é efetuada de forma prévia em relação à aquisição de imagens, com base em

métodos convencionais de parametrização de câmaras com reduzida distância focal, como é o caso das aplicações laboratoriais com distâncias de observação na ordem de grandeza do metro (*vide* Figuras 2.6 e 2.7) [ISI-SYS (2014)].



Figuras 2.6 e 2.7: Sistema estereoscópico de correlação de imagem aplicado em ensaio laboratorial (à esq.) e exemplo de resultado de medição dimensional (à dir.).

Na área específica das vibrações, surgiu recentemente a aplicação de sistemas ópticos de visão computacional no contexto da observação dinâmica. Este tipo de solução para a medição de grandezas em regime dinâmico apresenta elevada aplicabilidade ao nível da Engenharia Civil, em particular, na observação de infraestruturas e respetivos componentes estruturais como é o caso dos tirantes que compõem uma ponte atirantada [Caetano (2007)], onde o recurso a métodos convencionais por contacto (redes de acelerómetros) se revela limitado a um conjunto de pontos de interesse e cujo acesso é difícil e de instrumentação complexa e dispendiosa.

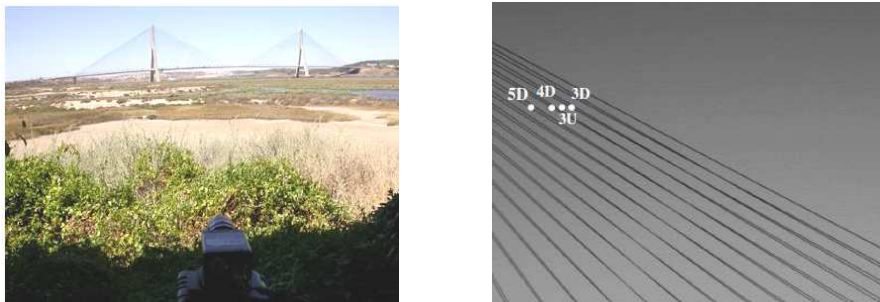
Em regra, este tipo de observação dinâmica recorre a sequência temporal de imagens digitais obtidas a partir de uma câmara, posicionada em região estática e orientada relativamente à região de interesse, sendo possível estabelecer distâncias de observação na ordem de grandeza da centena de metros, dependendo da distância focal da objetiva utilizada. A qualidade metrológica dos resultados obtidos está dependente de uma adequada parametrização geométrica da câmara, nomeadamente, da distorção que deverá ser contabilizada, sobretudo, no caso de objetivas com reduzida distância focal. Outro aspeto relevante corresponde ao ajuste dinâmico do ganho e do tempo de exposição da câmara, consoante a variação das condições de iluminação natural.

O método de processamento de imagem por análise do fluxo óptico revela-se particularmente interessante neste contexto por não estar dependente da extração (via

correlação de imagem por *template matching*, por exemplo) de informação de natureza geométrica de alvos ou do próprio componente estrutural observado, requerendo apenas uma única câmara para a concretização da observação dinâmica.

No referido método, cada par de imagens consecutivas suporta a determinação do campo vetorial associado à variação de intensidade entre imagens atribuída ao movimento dinâmico do componente estrutural observado, que pode ser estimado com base na resolução de uma equação diferencial que apresenta, como variáveis, as derivadas parciais da intensidade a nível bidimensional e temporal e as componentes bidimensionais do fluxo óptico. A solução desta equação pode ser obtida por várias abordagens, nomeadamente, pelos métodos Lucas-Kanade e Horn-Schunk, este último com melhor desempenho relativamente ao primeiro, mas necessitando de maior tempo para processamento. Após determinação do fluxo óptico entre imagens, estabelece-se uma relação de transdução cinemática (de píxeis·s⁻¹ para m·s⁻¹) com base num fator de escala determinado a partir do conhecimento de características dimensionais dos elementos observados.

Em [Caetano (2007)] é possível encontrar uma descrição da aplicação desta abordagem óptica de visão computacional à observação dinâmica de tirantes na Ponte Internacional sobre o rio Guadiana, com recurso a câmara digital com 50 mm de distância focal e capacidade de aquisição de 30 imagens por segundo com uma dimensão individual de (800 × 600) píxeis. Neste caso, foi estabelecida uma distância de observação de 850 m entre a câmara (posicionada na margem portuguesa do rio Guadiana) e a referida ponte atirantada, originando uma diagonal do campo de visão próxima de 100 m que permitiu a visualização da região de interesse ao nível dos tirantes, onde foram analisados quatro elementos distintos (*vide* Figuras 2.8 e 2.9) [Caetano (2007)]. Os registos temporais de velocidade dos pontos observados permitiram quantificar as primeiras frequências de vibração natural (compreendidas entre 0,9-Hz e 4,6-Hz), promovendo-se a validação dos resultados obtidos com base no registo temporal de aceleração associado a um dos tirantes instrumentado de forma convencional com um acelerómetro.



Figuras 2.8 e 2.9: Observação de tirantes na Ponte Internacional sobre o rio Guadiana.

No que respeita à observação dimensional terrestre de infraestruturas com recurso a sistemas ópticos de visão computacional, a sua descrição é apresentada em secção própria (2.3.4.4) em conjunto com outros métodos convencionais (secção 2.3.3) ou emergentes (secção 2.3.4).

2.3 Observação dimensional terrestre de infraestruturas

2.3.1 Enquadramento

No domínio da Engenharia Civil, a atividade de observação contribui de forma relevante para o estudo, caracterização e avaliação estrutural de infraestruturas ou grandes obras fundamentais. Nesse contexto destacam-se, em particular, as seguintes áreas de desenvolvimento:

- (i) redes de transportes nas quais pontes, viadutos, túneis, entre outras obras, asseguram a mobilidade de pessoas e bens;
- (ii) exploração de recursos naturais e produção de energia, onde intervêm obras de grande dimensão como barragens, estruturas marítimas e hidráulicas;
- (iii) edificação urbana, abrangendo obras diversas ao nível da habitação, do equipamento social e da atividade económica.

Numa perspetiva de análise de risco, os diferentes tipos de infraestruturas mencionadas possuem em comum o facto de um eventual cenário de falha estrutural durante as fases de construção, entrada ao serviço, exploração, reparação ou reforço estar associado a relevantes consequências humanas e económicas. Consequentemente, a

garantia de segurança, entendida como a capacidade da obra para satisfazer exigências estruturais de natureza ambiental e operacional, é um requisito obrigatório (*vide* [RSB (2007)] no caso de barragens), exigindo um conhecimento adequado do estado da infraestrutura por parte da sua entidade gestora, detetando, de forma atempada e oportuna, eventuais falhas na totalidade da sua vida útil que, em regra geral, se prolonga no tempo por várias décadas.

Em particular na fase de exploração, a atividade de observação suporta a estratégia de conservação e manutenção de uma grande obra e auxilia a entidade gestora no processo de tomada de decisão associado à definição da periodicidade de observação e à necessidade de intervenção imediata em situação de acidente (ocorrência excecional) ou definição de medidas corretivas num horizonte temporal mais prolongado a curto, médio ou longo prazo em caso de incidente, associado à deteção de anomalias, com implicações na funcionalidade e segurança da obra.

Num primeiro nível, a atualização regular do conhecimento da condição estrutural de uma grande obra é assegurada pela atividade de inspeção visual que visa a deteção de anomalias de natureza física (por exemplo, deformações excessivas, fissuração ou fratura de elementos estruturais) ou de natureza química (corrosão de elementos metálicos, reações expansivas do betão, entre outros fenómenos) com impacto no desempenho operacional e na segurança da obra. A inspeção visual assegura, igualmente, a deteção de anomalias no sistema de observação, caso exista em obra.

Num segundo nível, a inspeção visual é complementada pela observação visando a medição de grandezas que caracterizam, por um lado, o conjunto de ações de natureza ambiental (temperatura, humidade, precipitação, vento e atividade sísmica, entre outras) e operacional (por exemplo, o nível de albufeira em barragens ou o tráfego pedonal, rodoviário e ferroviário em pontes e viadutos) que atuam sobre a obra e, por outro lado, a avaliação dos efeitos dessas mesmas ações na correspondente resposta estrutural. Salienta-se, igualmente, a atividade de observação realizada no âmbito da caracterização:

- (i) dos materiais (betão, materiais metálicos e orgânicos, alvenaria, enrocamentos, entre outros) e componentes estruturais associados à obra, onde se inclui a

realização pontual de ensaios não-destrutivos¹⁶ sem impacto significativo na sua integridade estrutural;

- (ii) dos terrenos de construção da obra no que respeita à cartografia, prospeção geofísica e geológica dos elementos constituintes de maciços rochosos, solos, lamas, sedimentos, águas e resíduos.

A atividade de observação pode acompanhar uma obra em diferentes etapas do seu ciclo de vida, nomeadamente:

- (i) no projeto, fornecendo informação relevante sobre o local de construção contribuindo, deste modo, para o dimensionamento da obra e para a definição de condições de execução e exploração;
- (ii) na construção, acompanhando a evolução da obra e avaliando a sua conformidade relativamente às especificações de projeto, permitindo detetar eventuais erros construtivos e avaliar a eficácia das soluções propostas para a sua mitigação;
- (iii) na entrada ao serviço (por exemplo, no primeiro enchimento de uma barragem ou nos ensaios de receção de pontes e viadutos), contribuindo para a análise comparativa entre o comportamento real e o previsto nos modelos de projeto da obra, determinando a sua validação ou a necessidade de observações complementares; os resultados das observações realizadas nesta fase da vida da obra definem estados de referência em posteriores situações de deterioração ou ocorrência de acidente;
- (iv) na exploração, assegurando o conhecimento pontual ou permanente¹⁷ da condição real da obra no âmbito do julgamento da sua segurança estrutural e fornecendo informação relevante para parametrização, atualização e validação de modelos de cálculo comportamentais utilizados para a simulação de ocorrências excecionais, estudo de cenários de deterioração e de intervenção estrutural;

¹⁶ Suportados, por exemplo, em métodos ópticos, ultrassónicos, radiográficos, termográficos e eletromagnéticos.

¹⁷ A atividade de observação realizada de forma permanente ou contínua num cenário temporal de longo prazo adopta, em determinados contextos, a designação de monitorização.

- (v) no reforço ou reparação da obra, para avaliar o desempenho das soluções estruturais adotadas e, conseqüentemente, a sua conformidade face às especificações de projeto.

Com base em [Castro (2012)], [Marcelino (2012)] e [Rodrigues (2004)], no Quadro 2.3 são enumeradas as principais grandezas físicas medidas e respectivos padrões de trabalho utilizados em contexto de observação de grandes obras, distribuídas pelas áreas específicas de grandezas mensuráveis, com exceção da área de comprimento – discutida em detalhe no presente sub-capítulo – que são apresentadas no Quadro 2.4.

Quadro 2.3: Principais grandezas físicas e padrões de trabalho na observação de obras nas áreas específicas da massa, pressão, força, termohigrometria, caudal e vibração.

GRANDEZAS FÍSICAS	ÁREAS ESPECÍFICAS DO DOMÍNIO METROLÓGICO E PADRÕES			
	MASSA, PRESSÃO E FORÇA	TERMOHIGROMETRIA	CAUDAL	VIBRAÇÃO
	Força em elementos estruturais ^{3,4} Massa de veículos ³ Pressão intersticial ^{2,4} Sub-pressões ^{1,2,4} Tensão ^{1,2,4}	Temperatura e humidade do ar ^{1,2,3} Temperatura de elementos estruturais ^{1,2,3,4} Temperatura da água ^{1,2}	Nível de água ^{1,2} Precipitação atmosférica ^{1,2} Velocidade do vento ³ Caudal ^{1,2,4}	Aceleração ^{1,2,3} Velocidade ³
PADRÕES DE TRABALHO	Células de carga ³ Placas de flexão ³ Piezómetros ^{1,2,4} Atuadores hidráulicos ⁴ Células de tensão ou tensiómetros ^{1,2,4}	Cadeias de medição com sensores de temperatura (termístores, termopares, termómetros de resistência, fibras ópticas) ^{1,2,3,4} Termohigrómetros e termohigrógrafos ^{1,2,3}	Limnímetros e limnígrafos ^{1,2} Udómetros ou pluviómetros ^{1,2,4} Anemómetros ³ Bicas totalizadoras ^{1,2,4} Medidores de caudal ^{1,2,4}	Acelerómetros ^{1,2,3} Macrossismógrafos ^{1,2,3} Sismógrafos ^{1,2,3} Cadeias de medição com transdutores de velocidade ³ Vibrómetros laser ³

Legenda: 1-Barragens de betão; 2-Barragens de aterro; 3-Pontes e viadutos; 4-Fundações, túneis, terrenos, muros e escavações.

Salienta-se a natureza interdisciplinar da atividade de observação de grandes obras [Garrett (2007)], onde intervêm as áreas distintas da Engenharia Civil – Estruturas, Materiais, Geotecnia, Barragens de Betão, Hidráulica, Edifícios e Vias de Comunicação – em conjunto com a Instrumentação nas vertentes das Engenharias Física, Eletrotecnia, Mecânica, Tecnologias de Informação e da Metrologia.

Quadro 2.4: Principais grandezas físicas e padrões de trabalho na observação de grandes obras na área específica do comprimento.

GRANDEZAS FÍSICAS	PADRÕES DE TRABALHO
Deslocamento	Teodolitos ^{1,2,4} ; taqueómetros ^{1,2,4} ; distanciómetros ^{1,2,4} ; níveis ^{1,2,4} ; sistemas GNSS ^{1,2,3} ; sistemas ópticos terrestres e espaciais (detecção remota) ^{1,2,3,4} ; sistemas interferométricos ¹ ; sistemas laser ^{1,2,3} ; cadeias de medição com transdutores elétricos ^{1,3} ; comparadores ^{3,4} ; coordenómetros de fio de prumo ¹ ; tubos inclinométricos ^{1,4} ; assentímetros ^{2,4} ; níveis hidráulicos ^{2,3} ; fissurómetros ^{1,2,3,4} ; convergenciómetros ⁴ .
Rotação	Clinómetros mecânicos ou elétricos ^{1,2,3,4} .
Extensão	Extensómetros mecânicos (alongâmetros) ^{1,2,3} ; extensómetros de fita ⁴ ; extensómetros elétricos (indutivos, resistivos, capacitivos e piezoelétricos) ^{1,2,3} ; extensómetros de corda vibrante ^{1,2,3,4} ; extensómetros de fibra óptica ^{1,2,3} ; extensómetros de fundação ^{1,2,4} ; extensómetros de vara ⁴ ; extensómetros magnéticos ⁴ ; extensómetros de furos de sondagem ⁴ ; sistemas SFJ, LFJ e STT ¹ .

Legenda: 1-Barragens de betão; 2-Barragens de aterro; 3-Pontes e viadutos; 4-Fundações, túneis, terrenos, muros, escavações.

Neste contexto importa realçar a importância da partilha de informação entre as áreas mencionadas como forma de promover uma adequada relação obra/instrumentação, nomeadamente, na elaboração do plano de observação de uma grande obra (*vide* [RSB (2007)] para o caso de barragens¹⁸), em particular e se aplicável, na definição do sistema de observação onde, necessariamente, se promove uma avaliação dos requisitos técnicos exigidos e se pondera a adequação e disponibilidade de soluções comerciais que sejam economicamente viáveis.

O plano de observação constitui um elemento do projeto de uma grande obra, de carácter obrigatório [RSB (2007)] no caso de barragens de classe I (associadas a potenciais danos de elevada gravidade), que contribui para o controlo de segurança estrutural da obra nas diferentes fases da sua vida, desde a sua construção até ao fim da sua exploração ou demolição. Este documento, de carácter dinâmico, está sujeito a eventuais revisões e atualizações decorrentes do desempenho estrutural da obra observado ao longo do seu ciclo de vida e da ocorrência de situações de natureza excecional.

¹⁸ No caso de outras obras de grande dimensão como pontes, viadutos e edifícios, a regulamentação europeia sobre projeto de estruturas (Eurocódigos) é omissa quanto à definição de um plano de observação, ficando à consideração dos elementos intervenientes – projetista, dono de obra, construtor ou entidade gestora – a necessidade de elaboração deste documento, após julgamento ponderado do risco associado à construção, receção, exploração, reparação ou reforço da obra [Santos (2008)].

Em determinadas infraestruturas, a atividade de observação poderá estar integrada num processo SHM – *Structural Health Monitoring*, visando a concretização de uma estratégia de deteção de dano, de forma autónoma e contínua, a curto (por exemplo, provocados por eventos extremos como sismos ou explosões) ou a longo prazo (visando a avaliação do envelhecimento e degradação da infraestrutura) baseada na recolha e análise de informação [Figueiredo (2013)]. Este processo engloba três etapas distintas:

- (i) a recolha e o armazenamento automático de amostras espaciais e temporais de medições obtidas a partir de diferentes conjuntos de cadeias de medição distribuídas pela infraestrutura;
- (ii) o processamento dos dados tendo em vista a extração de características indiciadoras de dano nas amostras de medições recolhidas e atualização do respetivo registo histórico;
- (iii) a análise do registo histórico das características de interesse com algoritmos de auto-aprendizagem (inteligência artificial) tendo por objetivo a determinação e avaliação do estado atual da infraestrutura visando a identificação de desvios em relação ao comportamento estrutural expectável.

Numa fase inicial, os processos SHM estavam associados à deteção de danos em componentes de sistemas mecânicos e aeroespaciais, mas atualmente incluem também obras de grande dimensão no contexto da Engenharia Civil, sobretudo, ao nível de pontes, viadutos, barragens e edifícios. Em todos esses processos é possível reconhecer um paralelismo com o processamento nervoso humano, conforme ilustrado no Quadro 2.5.

Quadro 2.5: Relação de paralelismo entre processos informativos SHM e humano.

Etapas do processo informativo	SHM	Humano
Deteção	Dano	Dor
Captação	Cadeias de sensores	Cadeias nervosas
Processamento	Computacional	Cerebral
Decisão	Reparação e manutenção	Ação

Atualmente assiste-se à necessidade de integração dos resultados da atividade de observação nas vertentes da inspeção visual, ensaios não-destrutivos e monitorização em

Sistemas de Gestão de Infraestruturas (SGI) que auxiliam as entidades gestoras na otimização da estratégia de manutenção, reparação e reabilitação assegurando a definição de prioridades de intervenção no património gerido que, frequentemente, atinge uma dimensão elevada com implicações económicas significativas [Figueiredo (2013)]. Deste modo, correspondem a ferramentas de apoio à decisão, permitindo analisar sistematicamente a infraestrutura nas vertentes técnica e económica.

Este tipo de sistemas evoluiu de uma função inicial de inventário com informação básica das obras (data de construção, localização, entre outras) para a integração de informação complementar proveniente de inspeções visuais, ensaios não-destrutivos e monitorização visando a quantificação do seu desempenho operacional.

Atualmente, os SIG tendem a englobar toda a informação económica e técnica relevante sobre a infraestrutura durante o seu ciclo de vida, incluindo a informação proveniente de processos SHM, com benefícios mútuos: por um lado, a introdução de informação da atividade de medição permite mitigar as limitações inerentes à inspeção visual (informação com carácter subjetivo, de natureza qualitativa, falta de acesso a zona de interesse na obra) e, por outro lado, reduz-se a confiança excessiva nos sistemas de medição automática, vulneráveis a falhas, permitindo uma análise alargada dos dados recolhidos de natureza quantitativa e qualitativa.

Atendendo ao objetivo temático do presente sub-capítulo, as secções seguintes dão especial relevo à observação dimensional de obras de grande dimensão, em particular, a sua contribuição para a caracterização do comportamento da obra em regime estático e dinâmico (secção 2.3.2), promovendo uma descrição detalhada dos métodos, instrumentos e sistemas de medição convencionais (secção 2.3.3), emergentes (secção 2.3.4) e indiretos (secção 2.3.5).

2.3.2 Caracterização dimensional de infraestruturas

As medições de natureza dimensional obtidas pela atividade de observação de infraestruturas constituem um relevante contributo para a caracterização do comportamento real da obra e a consequente avaliação do seu desempenho estrutural face às solicitações ambientais e operacionais a que está sujeita. Em acréscimo, é comum a

sua utilização no âmbito da parametrização, atualização e validação de modelos de cálculo utilizados para efeito de simulação de ocorrências excepcionais e de cenários de deterioração ou intervenção estrutural, onde os valores medidos em obra constituem valores de referência, pelo que importa assegurar a respetiva qualidade metrológica necessária para atingir o nível de exatidão requerido no âmbito dos estudos realizados.

No domínio dimensional, a caracterização de uma obra sujeita a um determinado conjunto de solicitações estáticas ou dinâmicas de natureza ambiental e operacional é assegurada pela observação das grandezas deslocamento, rotação e extensão em elementos e regiões estruturais de maior relevância na obra.

No contexto das barragens de betão, a observação dimensional é realizada:

- (i) em galerias internas, mediante a medição de deslocamento horizontal nas componentes tangencial e radial pelo método do fio de prumo ou por métodos geodésicos que permitem, adicionalmente, a medição de deslocamento vertical;
- (ii) no coroamento, com a medição do deslocamento nas componentes horizontais e vertical por métodos geodésicos convencionais ou emergentes recorrendo, por exemplo, a sistemas GNSS;
- (iii) no paramento, recorrendo a observações geodésicas de marcações superficiais;
- (iv) na interface barragem/fundação, mediante a utilização de extensómetros de fundação para medição de deslocamentos horizontais;
- (v) nas juntas entre blocos, determinando a abertura e o deslizamento da junta a nível horizontal e vertical.

Num contexto de monitorização contínua em regime dinâmico de longo prazo, as observações mencionadas anteriormente permitem caracterizar a evolução do comportamento dimensional global de uma barragem face ao efeito sazonal combinado de ações de natureza ambiental (temperatura, humidade, precipitação) e operacional (nível da albufeira). Neste âmbito importa igualmente salientar o papel da caracterização dimensional da barragem na entrada ao serviço com o seu primeiro enchimento contribuindo, em conjunto com a medição complementar de outras grandezas de natureza

distinta, para a avaliação do comportamento estrutural da obra em situação de elevado grau de solicitação operacional, próxima do nível de pleno armazenamento.

No que respeita a outro tipo de infraestruturas de grande dimensão como pontes e viadutos, a observação dimensional é realizada ao nível de:

- (i) vãos, nomeadamente, as secções de $\frac{1}{2}$ vão e $\frac{1}{4}$ vão, promovendo-se a medição do deslocamento vertical mediante nivelamento hidrostático ou aplicação de comparadores (sempre que se verifique a existência de pontos de referência estáticos na proximidade do vão observado) e a medição da rotação (relevante para avaliação da solicitação por torção); é também recorrente a medição de extensões nestas secções ao nível de elementos estruturais relevantes como vigas, colunas e tirantes;
- (ii) aparelhos de apoio e juntas, cujo deslocamento relativo se pretende conhecer, em regra, com recurso a comparadores ou outro tipo de cadeias de medição dimensional;
- (iii) pilares e torres, existindo interesse na determinação da rotação ao nível das regiões do topo, $\frac{1}{2}$ altura e base mediante recurso a clinómetros;
- (iv) ancoragens, amarrações, encontros e fundações, utilizando métodos geodésicos para determinação de deslocamento horizontal e vertical e aplicando clinómetros tendo em vista a quantificação da rotação nestes elementos estruturais.

A observação dimensional de pontes e viadutos a longo prazo permite caraterizar a sua resposta estrutural, avaliando o impacto do efeito sazonal de solicitações ambientais (temperatura, vento, entre outros) e operacionais decorrentes, por exemplo, do tráfego pedonal, rodoviário e ferroviário. Neste âmbito importa destacar, igualmente, o contributo da caraterização dimensional de uma ponte ou viaduto na entrada ao serviço onde, em caso de elevado risco, se promove a realização de ensaios de receção, quer em regime estático, quer em regime dinâmico.

No que respeita a ensaios estáticos de receção de pontes e viadutos, em regra, é promovida a determinação de linhas de influência (*vide* Figura 2.10) [Santos (2007-a)] que constituem representações gráficas da evolução da grandeza dimensional –

deslocamento, rotação ou extensão – observada num determinado ponto de interesse da estrutura (por exemplo, a $\frac{1}{2}$ vão ou no topo de um pilar) em função da posição de uma carga circulante concentrada ou distribuída (neste caso, atingindo uma magnitude de sobrecarga), em regra, materializada por camiões ou locomotivas com peso conhecido, conforme se ilustra nas Figuras 2.11 e 2.12 [Marécos (1967)].

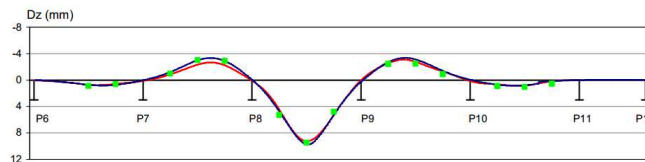


Figura 2.10: Exemplos de linhas de influência em viaduto.



Figuras 2.11 e 2.12: Ensaios de carga na P25A – carga concentrada (à esq.) e carga distribuída (à dir.).

O estudo dinâmico de grandes obras é assegurado por via da medição dimensional do deslocamento ou extensão numa base temporal (mais comum no caso de infraestruturas de maior flexibilidade caracterizadas por reduzidas frequências de vibração como, por exemplo, uma ponte suspensa com vão principal de elevada dimensão), da velocidade e da aceleração (em regra, a mensuranda mais usual em estruturas rígidas com frequências de vibração mais elevadas) em pontos de interesse da obra que suportam a avaliação de características do comportamento dinâmico, nomeadamente, a frequência e a configuração (forma geométrica) de vibração e o amortecimento, que determinam a resposta da obra a uma solicitação dinâmica que consiste numa combinação de um conjunto de modos de vibração independentes (longitudinais, transversais, verticais e torção).

O conhecimento real destas características garante um conhecimento do estado da infraestrutura observada, possibilitando uma avaliação comparativa com os valores estabelecidos no projeto da obra e permitindo, ao longo da sua exploração, a deteção de dano mediante alterações significativas da sua magnitude. Refere-se, igualmente, a sua contribuição para o ajuste de parâmetros (módulo de elasticidade, condições fronteira, interação com elementos estruturais e envolventes, por exemplo) e a validação de modelos de simulação de comportamento dinâmico em regime elástico.

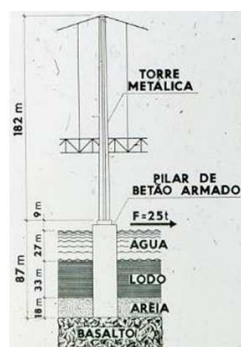
A quantificação de características dinâmicas em infraestruturas como pontes, viadutos, edifícios e barragens envolve a realização de atividade experimental dedicada, nomeadamente:

- (i) ensaios de vibração forçada, nos quais a obra é excitada de forma controlada num ou vários pontos promovendo-se a medição da resposta em vários pontos dessa obra; para tal, recorre-se a geradores de vibração do tipo servo-hidráulico ou mecânico de massas excêntricas (*vide* Figura 2.13) [Rodrigues (2004)] permitindo a aplicação de carga dinâmica (do tipo harmónico com ruído branco, por exemplo) com diferentes amplitudes e frequências (em regra, superiores a 1 Hz) o que é relevante para o estudo do comportamento dinâmico não-linear da obra, nomeadamente, das funções de resposta em frequência; é também possível recorrer a geradores de vibrações de impulso (por ação de martelo ou queda de peso) para a determinação de funções de resposta impulsiva no tempo; a execução deste tipo de ensaio dinâmico revela-se dispendiosa, exigindo um elevado esforço logístico e a interrupção operacional da obra.



Figura 2.13: Ensaio de vibração forçada numa barragem de betão com gerador de vibração de massas excêntricas.

- (ii) ensaios de vibração livre (*vide* Figuras 2.14 e 2.15) [Marécos (1964)], onde é imposto um estado de deformação inicial da obra, seguido de uma libertação súbita dessa imposição, registrando a consequente resposta em vibração, tendo em vista a identificação e quantificação de configurações e frequências de vibração e dos respectivos amortecimentos dinâmicos no decaimento registado; em regra, a deformação inicial da estrutura é realizada através de: a) um cabo ancorado no solo, estrutura vizinha, grua, caminhão ou rebocador, o qual é sujeito a tração mecânica até ao valor limite de uma ligação fusível; b) suspensão de massa, libertada de forma súbita mediante aplicação de explosivos ou corte; c) passagem de veículo pesado sobre ressalto colocado no pavimento da estrutura; a realização deste tipo de ensaio dinâmico implica o encerramento operacional da obra, requerendo cuidados particulares no que respeita à segurança, à escolha do ponto de aplicação de deformação (não deve ser coincidente com um nodo de vibração) e à possibilidade de ruído adicional por embate do cabo na estrutura observada [Rodrigues (2004)];



Figuras 2.14 e 2.15: Ensaio de vibração livre na fundação da P25A.

- (iii) ensaios de vibração ambiente, nos quais a obra é excitada de forma natural e não-controlada por ação ambiental (vento, microssismos, ondulação marítima e escoamento de rio) e operacional (tráfego pedonal, rodoviário e ferroviário), promovendo-se a medição da respetiva resposta mediante a determinação de grandezas dinâmicas de interesse (*vide* Figuras 2.16 e 2.17) [Rodrigues (2011-a)]; a motivação para a realização deste tipo de ensaio dinâmico reside na sua simplicidade e capacidade de concretização experimental sem interrupção operacional da estrutura; tem particular relevância no estudo do comportamento

dinâmico de obras de grande dimensão em que as principais frequências de vibração se situam abaixo de 1 Hz, visto ser difícil dispor de equipamento de vibração forçada nesta gama dinâmica de excitação [Rodrigues (2004)].



Figuras 2.16 e 2.17: Ensaio de vibração ambiente com medição de aceleração.

A qualidade das características dinâmicas extraídas dos ensaios mencionados anteriormente depende, em parte, do planeamento e da análise cuidada do processo de medição efetuado, nomeadamente, no que diz respeito à instrumentação utilizada para a medição dinâmica das grandezas de interesse, em particular, da sua gama de medição, sensibilidade (relevante em estruturas rígidas com deslocamentos de reduzida amplitude) e frequência de amostragem. Este último aspeto é particularmente relevante para o estudo rigoroso das frequências dos principais modos de vibração da infraestrutura devendo-se ter presente o Teorema da Amostragem [Shannon (1949)] na definição da frequência de amostragem, evitando erros de *aliasing* [Carvalho (2008)].

Com efeito, na observação dinâmica de estruturas promove-se uma frequência de amostragem superior, no mínimo, a duas vezes o limite superior da banda de frequências com conteúdo energético de interesse. Habitualmente, a frequência de amostragem ultrapassa esta indicação teórica tendo em conta a exatidão do mecanismo de relógio de amostragem do instrumento de medição e a remoção de frequências elevadas por ação de filtro do tipo passa-baixo e posterior decimação (reamostragem com frequência de amostragem mais reduzida).

Salienta-se, igualmente, a relevância da atividade de pós-processamento de sinal registado na identificação de anomalias (saturação, baixa relação sinal-ruído, ruído

intermitente, influência da rede elétrica, tendências espúrias, perda de sinal e pontos singulares), na aplicação de correções e fatores de escala, na junção de amostras temporais e na remoção de valores médios e tendências lineares comuns em registos com origem em acelerómetros.

O processo de identificação modal, isto é, da determinação dos modos de vibração, caracterizados pelas suas frequências, configurações e coeficientes de amortecimento, pode ser realizado mediante diversas técnicas e métodos no domínio da frequência e do tempo, tendo os métodos estocásticos particular interesse no caso dos ensaios de vibração ambiente [Rodrigues (2004)].

2.3.3 Métodos, instrumentos e sistemas de medição dimensional convencionais

2.3.3.1 *Medição por contacto*

Este tipo de medição caracteriza-se por promover o contacto entre o instrumento de medição e os pontos de interesse localizados no objeto observado (distribuídos num ou vários elementos) e na sua região envolvente, nomeadamente, zonas de comportamento estático (solo e ancoragens, por exemplo). As cadeias de medição por contacto possuem um elemento transdutor que converte a variação mecânica do deslocamento do objeto numa variação de uma grandeza mensurável, mecânica ou elétrica.

Numa perspetiva histórica, os sistemas de natureza exclusivamente mecânica foram os primeiros a serem utilizados no contexto de observação de grandes obras destacando-se, pela sua utilização recorrente nesse contexto, o defletómetro (comparador) de tambor, o convergenciómetro e o alongâmetro.

O defletómetro (comparador) de tambor (*vide* Figura 2.18) [Pereira (1967)] visa a medição de deslocamento vertical em vãos de estruturas relativamente ao solo, entre os quais se estabelece uma ligação através de um fio de ínvar¹⁹, sendo os deslocamentos da estrutura transmitidos por via mecânica até um registador analógico.

¹⁹ Liga de níquel e ferro caracterizada por um reduzido coeficiente linear de dilatação térmica.



Figura 2.18: Medição de deslocamento vertical do vão de um viaduto com recurso a defletómetro de tambor (à direita na imagem).

O convergenciómetro é um instrumento de medição por contacto utilizado no contexto de obras geotécnicas associadas à escavação de túneis e galerias, visando avaliar a convergência das paredes numa dada secção, conforme se ilustra na Figura 2.19 [Raposo (2011)]. Para tal, promove-se a medição das distâncias entre vários pontos localizados na parede da escavação, estabelecendo contacto através de haste ou fita, fazendo-se deste modo distinção entre convergenciómetro de haste (para secções com dimensão reduzida) e convergenciómetro de fita (para secções com dimensão elevada). Em ambos os tipos de equipamento, o deslocamento numa dada direção de observação é obtido por leitura direta num comparador.

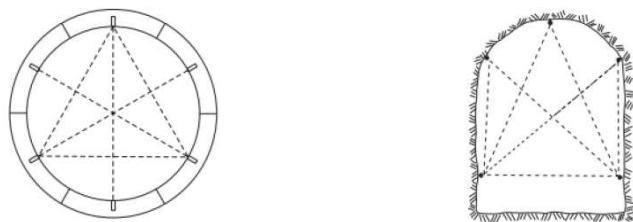
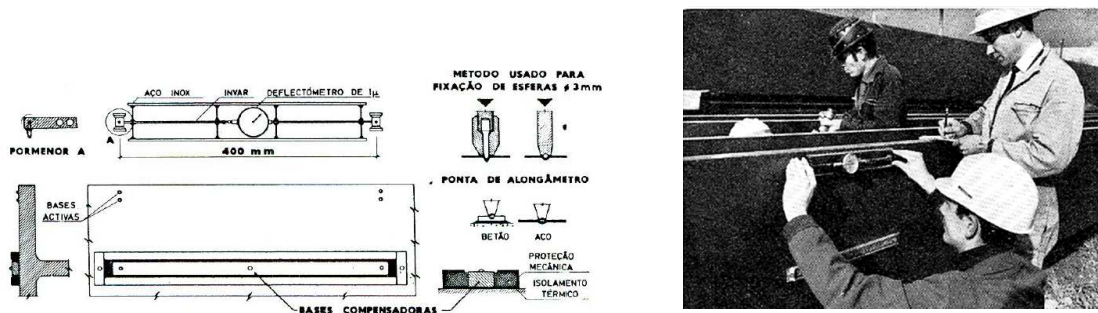


Figura 2.19: Pontos de referência para análise de convergência em perfis de túneis.

Por sua vez, o alongâmetro apresenta na sua constituição duas pontas esféricas para medição dimensional associadas, respetivamente, às hastes móvel e fixa de um comparador analógico determinando, deste modo, o deslocamento relativo entre pontos de medição. A realização das medições dimensionais é antecedida da leitura por aplicação do instrumento a um padrão de referência materializado numa barra de invar

tendo em vista a correção de efeitos sistemáticos associados a fenómenos de deriva instrumental do alongâmetro e à dilatação térmica decorrente da variação de temperatura ao longo do ano.

Nas Figuras 2.20 e 2.21 [Marécos (1967)] é possível observar a realização de medições lineares com alongâmetro ao nível de um elemento estrutural da viga de rigidez de uma ponte, visando a determinação das respectivas extensões. Note-se a existência de barra de ínvar fixada no elemento estrutural.



Figuras 2.20 e 2.21: Medição dimensional na viga de rigidez da P25A com recurso a alongâmetro.

Este tipo de medição é também bastante comum ao nível da observação de barragens de betão para obter a medição da abertura e deslizamento de fendas em maciços rochosos e do deslocamento relativo de juntas entre blocos (*vide* Figuras 2.22 e 2.23) [Moura (2005)]. Para tal, recorre-se a uma base de medição planar, na qual, três pontos de medição estão dispostos formando um triângulo equilátero. Com base no relacionamento geométrico entre pontos e nas respectivas medições das distâncias mútuas com recurso ao alongâmetro é possível determinar o deslocamento planar horizontal e vertical da junta.



Figuras 2.22 e 2.23: Alongâmetro e padrão de ínvar (à esq.) e base plana para medição em obra (à dir.).

A medição de deslocamentos tridimensionais neste contexto é assegurada pela utilização de bases dedicadas compostas por dois elementos (instalados individualmente em cada bloco e sem contacto mútuo), promovendo-se a medição do deslocamento relativo entre ambos nas direções de interesse usando um comparador, conforme ilustrado na Figura 2.24 [Castro (2012)].



Figura 2.24: Base para medição de deslocamento tridimensional entre blocos de uma barragem de betão.

Os sistemas tradicionais de medição mecânica continuam a ser utilizados na observação de grandes obras, notando-se uma tendência para a utilização crescente de sistemas de medição de natureza elétrica, considerando-os de melhor exatidão, entre outros aspetos, pela mitigação da componente de incerteza associada ao operador associada às operações de—montagem e de leitura e pela possibilidade de registo automático de medições. —Nas Figuras 2.25 a 2.27 [Castro (2012)] são apresentadas aplicações típicas de cadeias elétricas para medição dimensional em obra.



Figuras 2.25 a 2.27: Medição dimensional com recurso a cadeias de medição com sensores elétricos de deslocamento: em aparelhos de apoio (à esq.); em vãos de pontes e viadutos (ao centro); em juntas de barragens de betão (à dir.).

Dentro do conjunto de sistemas de medição dimensional suportados em fenómenos elétricos são particularmente utilizados sensores do tipo indutivo, nos quais a relação de transdução é associada ao fenómeno de variação da indução mútua, designando-se por LVDT – *Linear Variable Differential Transformer*. De acordo com [Palma (2010)], comparativamente com outros tipos de sensores elétricos de posicionamento linear²⁰, o LVDT apresenta como principais vantagens: (i) a reduzida magnitude da incerteza de medição associada à linearidade do sensor; (ii) a elevada sensibilidade de medição, permitindo resoluções na ordem de $0,1 \mu\text{m}$; (iii) um adequado isolamento elétrico entre circuito de excitação e enrolamento de saída.

Este tipo de sistema de medição é composto por uma haste que, numa extremidade, está em contacto direto (via ponta de contacto ou rótula) ou indireto (via aplicação de fio de prumo) com a região cujo deslocamento se pretende medir, encontrando-se a restante extremidade inserida num núcleo eletromagnético posicionado entre o enrolamento primário (de excitação) e os enrolamentos secundários (conforme ilustrado na Figura 2.28).

No referido circuito eletromagnético identificam-se grandezas elétricas de associadas à resistência elétrica (R), ao coeficiente de auto-indução (L) e ao coeficiente de indução mútua (M) do enrolamento primário (e) e dos enrolamentos secundários (1 e 2). A ocorrência de reduzidos deslocamentos do núcleo relativamente aos

²⁰ Onde se incluem relações de transdução de posição linear do tipo resistivo, capacitivo, indutivo, por variação de relutância e por correntes de Foucault.

enrolamentos mencionados origina uma variação aproximadamente linear da diferença entre coeficientes de indução mútua dos enrolamentos secundários ($M_1 - M_2$), observando-se variações pouco significativas ao nível dos coeficientes de auto-indução L_1 e L_2 , variando ligeiramente o coeficiente de auto-indução L_e e o coeficiente de indução mútua M_3 , mantendo-se constante as várias resistências elétricas assinaladas (R_e , R_1 e R_2).

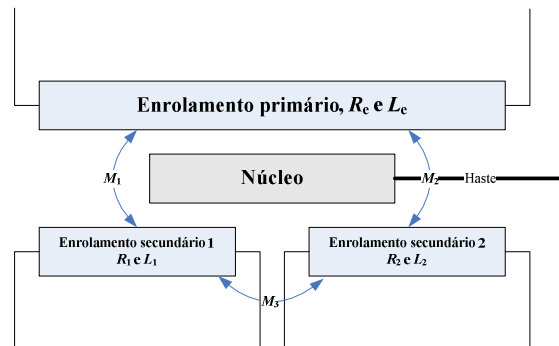


Figura 2.28: Representação esquemática do circuito eletromagnético associado a um sensor elétrico do tipo LVDT (adotado de [Palma (2010)]).

A excitação do enrolamento primário deve ser realizada à frequência necessária para garantir um desfasamento nulo entre as tensões elétricas de entrada e saída, podendo ser realizada a tensão elétrica constante ou, preferencialmente, a intensidade de corrente elétrica constante de modo a minimizar o efeito da temperatura na resistência global do enrolamento secundário. Salienta-se que, o efeito de carga (diminuição da resistência) ao nível dos enrolamentos secundários diminui a sensibilidade do sistema de medição.

As cadeias de medição dimensional com LVDT apresentam como principais limitações a influência da temperatura, a reduzida gama de medição, o complexo condicionamento de sinal e o efeito de *ripple* no sinal analógico de saída. Contudo, comparativamente com outro tipo de cadeias de medição elétrica, continua a apresentar vantagens evidentes, designadamente, em relação às cadeias de medição com princípio de funcionamento resistivo que, embora possuam maior simplicidade, robustez e resposta dinâmica, apresentam vulnerabilidades ao nível da sua homogeneidade, linearidade, desgaste mecânico, resistência de contacto e perturbações parasitas de auto-indução e capacitivas.

2.3.3.2 Medição por nivelamento hidrostático

Os sistemas de nivelamento hidrostático são utilizados em contexto de observação dimensional de obras de grande dimensão tendo em vista a medição de deslocamentos verticais no seu interior. Este tipo de medições, suportado no princípio dos vasos comunicantes, recorre ao estabelecimento de um circuito hidráulico entre dois pontos da estrutura – de referência e de medição – em que se assume uma distribuição hidrostática da pressão da água em condições de homogeneidade, designadamente, no que diz respeito à massa volúmica da água. Deste modo, é possível garantir uma relação de transdução entre a grandeza de interesse – deslocamento vertical – e as grandezas medidas – nível de água ou pressão.

Tradicionalmente, o circuito hidráulico estabelecido entre reservatórios de referência e de medição encontrava-se em regime aberto (sujeito a pressão atmosférica), assegurando-se um nível constante de água no reservatório de referência mediante um sistema permanente de carga e descarga. No reservatório de medição, a observação do nível de água era realizada de forma manual, com recurso a escala graduada, ou de forma automática, recorrendo a sistema de ligação mecânica do flutuador do reservatório de medição ao registador de tambor.

Atualmente, o tipo de circuito hidráulico aplicado em obra evoluiu para um regime fechado, mantendo uma pressão hidrostática constante no reservatório de referência e promovendo a aplicação de células de pressão em pontos de interesse do circuito (*vide* Figura 2.29) [Santos (2007-a)], permitindo a medição contínua e automatizada da pressão hidrostática nesses pontos.



Figura 2.29: Componentes do sistema de nivelamento hidrostático: célula de pressão (à esq.) e reservatório de referência (à dir.).

No contexto de observação de pontes e viadutos, a configuração mais comum do sistema de nivelamento hidrostático consiste na montagem do reservatório de referência no topo de um pilar e na distribuição de células de pressão ao longo do restante circuito hidráulico instalado no interior do vão de interesse, permitindo observar o seu deslocamento vertical relativamente ao topo do pilar.

Salienta-se a utilização deste sistema de medição dimensional, sobretudo, ao nível da observação de pontes e viadutos de betão cujo comportamento dinâmico (caraterizado por vibrações de alta frequência e reduzida amplitude) é compatível com o elevado tempo de resposta associado a este método de medição. Este facto torna inadequada a sua aplicação na observação de grandes obras com resposta estrutural dinâmica de baixa frequência e elevada amplitude como é o caso de pontes suspensas de grande dimensão.

No que respeita a fontes de incerteza de medição específicas deste método mencionam-se a variação espacial e temporal da massa volúmica da água no circuito hidráulico decorrente da influência da variação da temperatura e da presença indesejável de bolhas de ar.

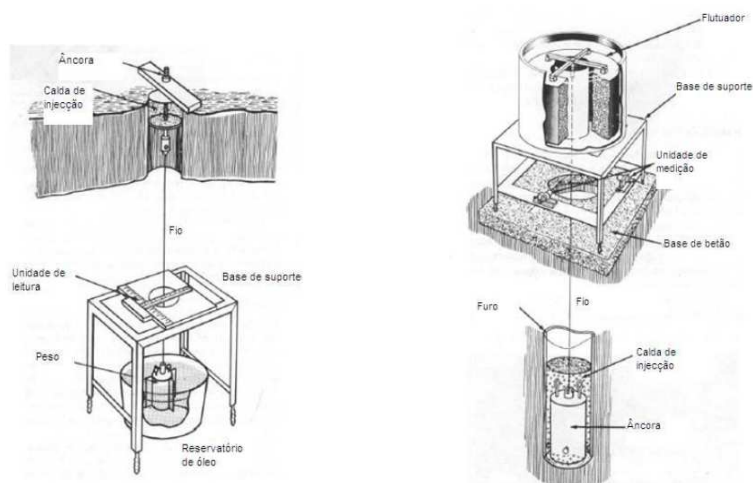
2.3.3.3 Medição com fio de prumo

A medição dimensional com recurso ao método do fio de prumo visa a determinação de deslocamentos horizontais em duas direções ortogonais no interior de grandes obras, nomeadamente, em galerias de barragens de betão e em vigas em caixão, pilares e torres ocas de pontes e viadutos. Este tipo de medição baseia-se na materialização de uma linha vertical mediante tração de um fio de aço de elevada resistência mecânica que atravessa o corpo da obra ou o elemento estrutural de interesse.

Os modos de tração do referido fio de prumo definem duas variantes de método de medição:

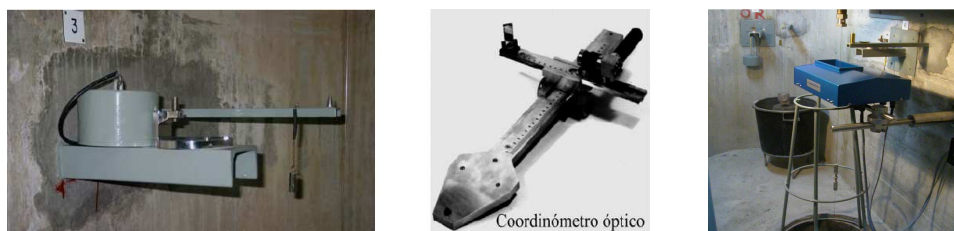
- (i) método do fio de prumo direito – no qual se promove a tração do fio por ação gravítica terrestre sobre um corpo suspenso numa extremidade do fio, enquanto a extremidade oposta é fixa num ponto da estrutura de cota altimétrica superior, permitindo a medição de deslocamentos horizontais relativos a esse ponto de fixação (*vide* Figura 2.30) [Raposo (2011)];

- (ii) método do fio de prumo invertido – onde a tração do fio é realizada por ação de impulsão hidrostática sobre um corpo flutuante colocado no interior de um reservatório com água e ligado ao fio; neste caso, a extremidade oposta do fio de prumo está fixa a uma região profunda da fundação da obra que se assume estática, permitindo a medição de deslocamentos horizontais absolutos (*vide* Figura 2.31) [Raposo (2011)].



Figuras 2.30 e 2.31: Método do fio de prumo: direito (à esq.) e invertido (à dir.).

A medição de deslocamento horizontal, obtida pela variação da posição do fio de prumo, é realizada sem contacto através de coordenómetros ópticos (*vide* Figuras 2.32 a 2.34) [Moura (2005)] [Marécos (2007)] de forma manual ou automática (neste caso apresentam a designação de telecoordenómetros).



Figuras 2.32 a 2.34: Medição de deslocamentos horizontais no interior de uma barragem de betão: base para medição manual (à esq.); coordenómetro óptico (ao centro); telecoordenómetro (à dir.).

A gama de medição deste tipo de instrumentação situa-se, em regra, entre 50 mm a 150 mm, quer na direção tangencial quer na direção radial, com uma resolução de 0,01 mm e um nível de exatidão na ordem de magnitude sub-milimétrica.

Este tipo de medição dimensional está limitado a regiões interiores das obras devidamente protegidas da ação do vento, o qual pode induzir perturbações pela aplicação de vibrações ao fio de prumo. Este aspeto constitui um argumento para a sua inadequação à realização de medições dimensionais em regiões exteriores da obra.

2.3.3.4 Medição geodésica

No âmbito da atividade de observação geodésica, a medição de deslocamento pode ser realizada a nível vertical (altimétrico) e a nível horizontal (planimétrico), sendo possível combinar ambos os tipos de medição para a avaliação de deslocamentos num espaço tridimensional. Trata-se de um método convencional cuja aplicação no contexto de observação de barragens (*vide* Figura 2.35) [Almeida (2009)] remonta aos anos 20 do século XX [Berberan (2011)] e que, atualmente, continua a contribuir para a sua observação dimensional.



Figura 2.35: Observação geodésica de barragem de betão com recurso a taqueómetro.

As medições de deslocamento efetuadas neste contexto são suportadas no estabelecimento de uma rede de observação que consiste na materialização de pontos distribuídos espacialmente pela obra e zonas adjacentes, entre os quais se medem ângulos (horizontais e verticais) e distâncias mediante o recurso a equipamentos de medição sem contacto como teodolitos, taqueómetros, distanciómetros eletromagnéticos e níveis.

Consoante o seu propósito, os pontos materializados em obra podem ser agrupados nas seguintes categorias [Raposo (2011)]:

- (i) pontos objeto – localizados na obra observada e cujo deslocamento é sujeito a medição;
- (ii) pontos de referência – localizados em zonas vizinhas à obra, em terrenos com comportamento geológico estável (região estática);
- (iii) pontos auxiliares – localizados na obra observada mas sem interesse dimensional, apoiando o processo de medição de pontos objeto.

Estes pontos podem estar associados a:

- (i) elementos de centragem forçada (tipo Wild ou Kern), permitindo a instalação de alvos retrorrefletores prismáticos ou de equipamentos de medição;
- (ii) alvos e miras para pontaria óptica;
- ~~(i)~~(iii) tacos de nivelamento.

No conjunto de métodos de medição dimensional mais comuns na atividade de observação geodésica destacam-se:

- (i) triangulação – medições de distâncias e ângulos verticais e horizontais entre pontos de referência, pontos objeto e pontos auxiliares, permitindo o ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ);
- (ii) trilateração – medição de distâncias entre pontos, permitindo a determinação das coordenadas de pontos objeto com base em relações matemáticas de natureza geométrica associadas a círculos, esferas e triângulos;
- (iii) poligonação – medição sucessiva de ângulos azimutais e distâncias entre pontos e suportada em relações planimétricas;
- ~~(i)~~(iv) nivelamento – medições de deslocamento a nível vertical, recorrendo a um ponto inicial de altitude conhecido que é transmitida e atualizada para os restantes pontos da rede através de medições de ângulos verticais e distâncias; o nivelamento pode ser direto ou geométrico – de maior exatidão e morosidade – e indireto ou trigonométrico – de menor exatidão, mas mais expedito.

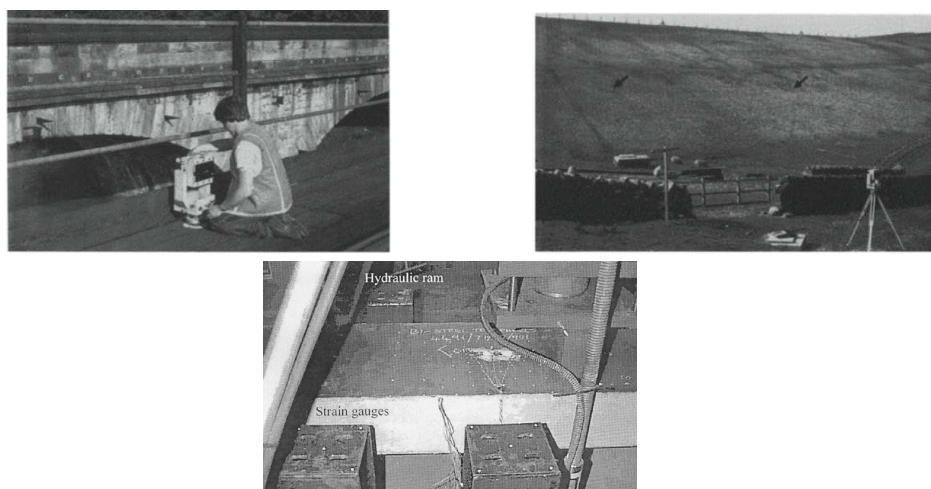
Em regra, as medições dimensionais de natureza geodésica são efetuadas em obra com periodicidade definida, permitindo criar um registo histórico onde as medições efetuadas na construção ou entrada ao serviço da obra constituem valores de referência, podendo propagar desvios sistemáticos às restantes medições. O nível de exatidão observado situa-se, em regra, na ordem de magnitude sub-milimétrica a milimétrica.

2.3.3.5 Fotogrametria terrestre

A fotogrametria consiste num método de medição dimensional de coordenadas tridimensionais de pontos num objeto de interesse mediante recurso a imagens bidimensionais desse objeto, e cuja origem remonta à segunda metade do século XIX sendo nesta época utilizado no registo arquitetónico de património edificado ou na produção cartográfica de cadeias montanhosas e glaciares [Armer (2001)]. Em regra, faz-se a distinção entre fotogrametria terrestre e aérea consoante o local de instalação do equipamento fotográfico em tripés ou em aeronaves, respetivamente.

O desenvolvimento de meios computacionais digitais nos anos 90 do século XX abriu o leque de aplicações deste método de medição que assim, para além dos domínios arquitetónico e geográfico, passou a abranger domínios diversificados das Engenharias, nomeadamente, da Engenharia Civil (*vide* Figuras 2.36 a 2.38) [Armer (2011)] onde é utilizado para observação dimensional terrestre de fachadas de edifícios, viadutos e pontes, zonas costeiras, barragens de aterro, obras geotécnicas (túneis, aterros e muros de suporte) e no ensaio laboratorial de componentes estruturais (por exemplo, em vigas, colunas e tirantes) [Armer (2001)], sendo considerada uma solução alternativa à medição geodésica, caracterizada por uma execução operacional mais morosa, e à medição por contacto, limitada a um número restrito de pontos de medição e dependente de acesso e espaço para instalação dos sensores [Valença (2007)].

Neste tipo de aplicações, onde a dimensão da região observada ou a distância de observação são inferiores a 100 m, a fotogrametria terrestre é designada por fotogrametria de curto alcance (tradução do autor da designação anglo-saxónica de *close-range photogrammetry*) recorrendo-se a câmaras com objetivas de reduzida ou média distância focal (em regra, situada entre 20 mm e 150 mm).



Figuras 2.36 a 2.38: Medição fotogramétrica em: pontes (em cima à esq.); barragens de aterro (em cima à dir.); ensaio de componentes estruturais (em baixo).

A concretização atual do processo fotogramétrico terrestre implica o recurso a câmaras digitais do tipo *off-the-shelf* com sensores de médio ou elevado número de píxeis de dimensão reduzida, que permitem adquirir imagens de alvos distribuídos uniformemente pela estrutura observada e pela região envolvente, estabelecendo redes de controlo ou triangulação entre as posições de aquisição de imagem (multiestações) e os alvos, os quais são, em regra, de natureza passiva com ou sem capacidade retrorrefletora. Note-se que a utilização de alvos retrorrefletores conjugada com iluminação artificial (do tipo *flash*) no momento de aquisição de imagem, é traduzida num aumento significativo da qualidade da imagem dos alvos observados [Jiang (2008)].

Nos alvos visíveis nas imagens adquiridas faz-se distinção entre:

- (i) alvos de controlo, cujas coordenadas num dado referencial de medição são previamente conhecidas (por exemplo, com recurso a medição geodésica), sendo utilizadas no processo de triangulação para efeito de construção do modelo ou para avaliação dos resíduos produzidos por este;
- (ii) alvos de monitorização, cujas coordenadas são obtidas após construção de modelo resultante do processo de triangulação.

Refira-se que, no contexto da observação dimensional de infraestruturas, os alvos de controlo estão localizados em regiões estáticas ou de dinâmica reduzida enquanto que os alvos de monitorização estão distribuídos espacialmente pela obra observada.

Em regra, o processo de triangulação baseia-se no método de feixes perspectivos suportado na projeção central traduzida pelas equações de colinearidade entre o alvo na imagem, o centro de projeção da câmara e o alvo no mundo. Neste processo é necessário fornecer, como dados de entrada, os parâmetros intrínsecos da câmara utilizada (distância focal, coordenadas do ponto principal e coeficientes de distorção óptica da objetiva da câmara e as coordenadas dos alvos nas imagens). Adicionalmente, é possível introduzir constrangimentos de natureza dimensional (por exemplo, distâncias relativas) e geométrica (ângulos relativos e relações de paralelismo ou perpendicularidade) entre alvos. Este tipo de abordagem fotogramétrica não está limitado a configurações do tipo estereoscópica, permitindo a aplicação de redes multiestação convergentes (em relação à obra observada) e de múltiplas câmaras.

Segue-se um processo iterativo de otimização, suportado na linearização das equações de colinearidade e na aplicação do MMQ na minimização dos resíduos (diferença entre coordenadas medidas e calculadas) dos alvos de controlo, que tem por objetivo a determinação de soluções numericamente estáveis relativamente aos parâmetros extrínsecos (posição e orientação da câmara no momento de aquisição de imagem) e às coordenadas mundo dos alvos de monitorização. Note-se que poderão existir problemas de instabilidade associados à necessidade de fornecimento de valores iniciais aproximados para todas as incógnitas.

Atualmente, estão disponíveis aplicações computacionais fotogramétricas que asseguram a automatização do reconhecimento, classificação e medição de coordenadas dos alvos nas imagens, auxiliando na gestão da informação de entrada associada às câmaras utilizadas e aos alvos de controlo, no cálculo automático das soluções pretendidas e na construção e interpretação de modelos cuja análise temporal permite avaliar a existência de deslocamentos tridimensionais na obra.

O correspondente nível de exatidão das referidas coordenadas está dependente:

- (i) do número de imagens disponíveis em que um determinado alvo de monitorização é visível;
- (ii) do nível de exatidão dos parâmetros intrínsecos da câmara e das coordenadas mundo dos alvos de controlo;
- ~~(i)~~(iii) da distribuição geométrica e do número dos alvos de controlo.

De acordo com [Redweik (2011)], a fotogrametria terrestre constitui uma solução particularmente vantajosa sempre que:




- (i) seja necessário acompanhar a evolução temporal de fenómenos a longo prazo, sobretudo quando existe arquivo fotográfico disponível para análise;
- (ii) os objetos observados apresentem uma dimensão excessivamente elevada ou reduzida para a instalação de alvos geodésicos;
- (iii) o objeto não permita medições por contacto, por exemplo, em edificações com elevado valor histórico;
- (iv) existe necessidade de recolher informação visual da região envolvente aos pontos de medição;
- ~~(i)~~(v) o objeto observado apresente formas geométricas (linhas, áreas e superfícies) específicas e exista a necessidade de quantificação de um número elevado de pontos de medição.

2.3.4 Métodos, instrumentos e sistemas de medição dimensional emergentes

2.3.4.1 Medição com GNSS

A medição tridimensional suportada em GNSS tem vindo a ser cada vez mais utilizada no contexto da observação de obras, numa fase inicial (no final dos anos 90 do século XX) em estruturas de elevada dimensão e flexibilidade como pontes suspensas e edifícios altos, onde ocorrem deslocamentos de grande amplitude e, mais recentemente, em obras de grande dimensão como barragens, em virtude da melhoria da exatidão ocorrida neste tipo de sistemas. No Quadro 2.6 apresentam-se alguns exemplos de aplicação.

Quadro 2.6: Exemplos de aplicação de sistemas GNSS na observação de grandes obras.

 <p>Ponte suspensa Tsing Ma (Hong Kong, China)</p>	 <p>Pontes atirantadas Ting Kau (em cima) e Kap Shui Mun (em baixo) (Hong Kong, China)</p>	 <p>Barragem de betão Genna Is Abis (Itália)</p>	 <p>Edifício Republic Plaza (Singapura)</p>
<p>Observação contínua de deslocamentos verticais e laterais no topo de torres e nos vãos principal e laterais, com recurso a dois recetores de referência e 27 recetores de medição [Wong (2001)]</p>		<p>Observação contínua de deslocamentos tridimensionais no coroamento recorrendo a um recetor de referência e quatro recetores de medição [Barzaghi (2012)]</p>	<p>Observação contínua de deslocamentos horizontais no topo de edifício com 280 m de altura mediante aplicação de três recetores GPS [Khoo (2010)]</p>

Os sistemas GNSS integram vários sistemas de posicionamento [Antunes (2010)], conforme mencionado no Quadro 2.7, estando atualmente operacionais, a nível global, o sistema norte-americano GPS – *Global Positioning System* e o sistema russo GLONASS – *Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema* – sendo possível, em determinados equipamentos, a utilização individual ou combinada de ambos os tipos de sinal. Atualmente, o sistema de posicionamento GPS é o mais utilizado a nível mundial, estando operacional desde 1978 para fins militares e desde 1994 para uso civil global.

Quadro 2.7: Sistemas de posicionamento global que integram o sistema GNSS.

Designação	Data	País	Cobertura	N.º de satélites
GPS	1994	EUA	Global	24
GLONASS	1995	Rússia	Global	24
BeiDou 1	2000	China	Regional	3
IRNSS	2016*	Índia	Regional	7
GALILEO	2019*	UE	Global	30
BeiDou 2	2020*	China	Global	35

* Data prevista.

No sistema de posicionamento GPS identificam-se três componentes:

- (i) espacial – corresponde a uma constelação de 24 satélites distribuídos por seis órbitas circulares em torno da Terra;
- (ii) controlo – composta por um conjunto de estações terrestres (uma estação principal e cinco estações de monitorização, das quais três são transmissoras de informação para os satélites) que avaliam o funcionamento e posicionamento dos satélites em órbita, determinando a necessidade de se efetuarem correções de órbita ou mesmo a substituição de satélites, efetuando a sincronização dos relógios atómicos dos satélites e atualizando o conteúdo informativo do sinal emitido pelos satélites destacando-se, pelo seu impacto no nível de exatidão, as correções associadas aos efeitos atmosféricos e à posição do satélite;
- (iii) utilitária – associada aos diferentes tipos de recetores terrestres de sinal utilizados para diversos fins militares e civis, nos quais se promove a receção, descodificação e processamento dos sinais emitidos pelos satélites tendo em vista a determinação das grandezas tempo, posição e velocidade.

O princípio de medição dimensional é baseado no fenómeno de propagação atmosférica de sinais eletromagnéticos modelados e emitidos pela componente espacial (satélites) em direção à superfície terrestre onde se promove a sua receção e desmodulação. Em cada recetor, o sinal recebido de um dado satélite possui informação que permite determinar a distância entre o satélite e o recetor com base na velocidade da luz. A receção de sinais provenientes de múltiplos satélites permite determinar, para um dado instante, um conjunto de distâncias recetor/satélite que podem ser geometricamente interpretadas como raios de esferas centradas na posição instantânea dos satélites, intersetando-se no ponto onde está localizado o recetor. Deste modo, para a determinação da posição do recetor (latitude, longitude e altitude) são necessários, no mínimo, sinais de três satélites distintos verificando-se que, maior for o número de satélites visíveis pelo recetor, maior será o nível de exatidão associado à sua posição.

No caso do sistema de posicionamento GPS, o sinal eletromagnético, formado a partir de um sinal base com uma frequência fundamental, é composto por ondas portadoras (L1 e L2, com frequências na gama das ondas de rádio de ultra alta

frequência) e códigos de dígitos binários PRN – *Pseudo Random Noise*, agrupados em três categorias:

- (i) código P (*Precise* ou *Protected*) – assegura melhor qualidade na determinação do posicionamento do recetor sendo utilizado exclusivamente para fins militares, estando protegido contra ações de sabotagem de sinal;
- (ii) código C/A (*Coarse Acquisition* ou *Clear Access*) – permite ao recetor distinguir múltiplos satélites na mesma frequência;
- (iii) código D (*Navigation Message*) – contém informação relevante relativa à posição do satélite, tempo universal coordenado (UTC), correções de sincronização temporal e de efeitos atmosféricos, entre outras informações.

A determinação da distância entre satélite e recetor, que suporta a determinação da posição do recetor num dado instante de tempo, pode ser obtida por duas vias de processamento – código ou fase – consoante se promova a determinação do tempo de percurso do sinal através do desfasamento dos códigos PRN ou através da diferença de fase entre o sinal gerado no recetor e o sinal emitido pelo satélite, sendo esta última via mais exata que a primeira.

A observação dimensional em regime dinâmico por sistema GPS é realizada por método diferencial (DGPS – *Differential Global Position System*) recorrendo a um recetor de referência (associado a uma posição terrestre bem conhecida) na qual se determinam correções aplicáveis às distâncias entre recetores e satélites. A emissão das referidas correções em tempo real (RTK – *Real Time Kinematics*) numa dada área geográfica contribui para um aumento significativo do nível de exatidão do posicionamento de um recetor de medição localizado nessa área que, nesta situação, toma a designação de PDGPS – *Precise Differential Global Position System*. A proximidade entre recetores de referência e de medição revela-se determinante para o nível de exatidão obtido na medição dimensional. Destaca-se, igualmente, a importância da antena associada ao recetor, a qual deverá ser do tipo *choke ring* visando a mitigação do efeito de multitrajeto do sinal e melhoria da estabilidade do centro de fase, devendo apresentar uma robustez adequada à ação do vento e de pássaros.

No conjunto de fontes de incerteza associadas à posição do recetor é possível destacar:

- (i) ao nível da componente espacial: a posição do satélite e a exatidão do relógio atómico²¹;
- (ii) ao nível do recetor: o efeito multitrajeto do sinal captado na antena; a variação do centro de fase; a exatidão do relógio interno e o ruído eletrónico;
- (i)(iii) ao nível do meio de propagação: o efeito da propagação de sinal na troposfera (camada mais interior da atmosfera terrestre até 40 km – 50 km de altitude, que constitui um meio dispersivo que provoca atrasos no sinal, sendo possível corrigir este efeito) e na ionosfera (camada atmosférica compreendida entre 100 km e 1000 km de altitude que, embora não seja um meio dispersivo, possui partículas ionizadas que originam atrasos no sinal, não sendo possível efetuar a sua correção).

No contexto de observação de grandes obras, a utilização de sistemas GNSS tem-se revelado atrativa face à sua capacidade de funcionamento contínuo em qualquer região do globo, permitindo medições tridimensionais de regiões estruturais com um nível de exatidão considerado aceitável podendo, em alguns casos, apresentar frequências de aquisição adequadas à determinação de modos de vibração natural de elevado período.

Como limitações deste tipo de sistemas de medição mencionam-se:

- (i) a necessidade de garantir de forma contínua um número mínimo de três satélites visíveis, o que pode ser dificultado pela orografia da zona de observação ou pela presença de árvores ou edificação urbana;
- (ii) o nível de exatidão está dependente de: efeitos atmosféricos (chuva, neve, granizo, entre outros); efeitos de multirreflexão dos sinais na obra, particularmente significativa em estruturas metálicas com múltiplos elementos; do número e configuração geométrica dos satélites;

²¹ Até maio de 2000, o Departamento de Defesa dos EUA recorria a técnica de acesso seletivo (SA–*Selective Availability*) onde se promovia a introdução de erros pseudoaleatórios no relógio do satélite e na posição emitida visando a redução da qualidade da informação do sistema GPS.

(ii)(iii) é vulnerável a sabotagem de sinal (*jamming*).

De referir igualmente, o método de pseudossatélites [Barnes (2003)], no qual se recorre a sistemas emissores terrestres localizados em pontos estáticos próximos da estrutura que se pretende observar, tornando dispensável o recurso a sinais provenientes de satélites a partir do uso de quatro pseudossatélites. A distribuição dos elementos emissores é configurável a nível local, ao contrário da abordagem com satélites. Aplicações em pontes no Reino Unido (*vide* Figura 2.39) [Barnes (2003)] e na Austrália revelaram melhoria na exatidão (50%) com a utilização exclusiva de pseudossatélites.

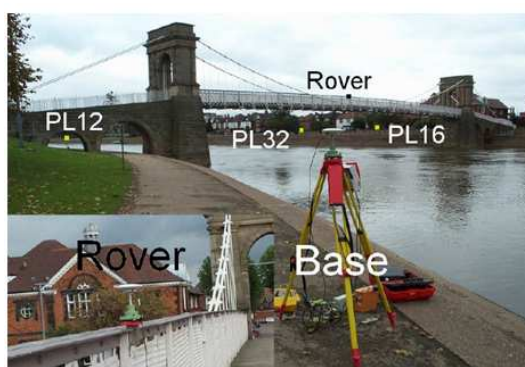


Figura 2.39: Observação dimensional de ponte suspensa com sistema de pseudossatélites.

2.3.4.2 Medição interferométrica com sistema radar

O desenvolvimento dos sistemas RADAR – *Radio Detection And Ranging*, no decurso da 2ª Guerra Mundial, orientados para a deteção de navios e aviões a longa distância, constituiu o ponto de partida para a sua posterior adaptação e utilização na observação aérea e espacial da superfície terrestre no contexto da Deteção Remota, iniciada nas décadas de 60 e 70 do século XX, tendo como objetivo determinar a distância entre elementos emissor (avião ou satélite) e refletor (superfície terrestre).

A realização periódica deste tipo de medição, em particular através de satélites²², tem permitido quantificar deslocamentos em regiões da superfície terrestre, contribuindo para o estudo de fenómenos sismológicos, vulcânicos e geológicos. Contudo, a sua

²² Através dos satélites ERS-1 (1991-2000), ERS-2 (1995-2011), ENVISAT (2002-2012), COSMO SkyMed (2007-...) e o TerraSAR-X (2008-...).

aplicação no contexto da medição de deslocamentos dinâmicos em grandes obras é bastante limitada pelo facto de não ser possível controlar a existência de pontos de medição numa determinada região de interesse na obra. Quando tal situação excecional ocorre (*vide*, por exemplo, [Sousa (2012)]), apenas é possível analisar a evolução temporal do deslocamento vertical da obra a longo prazo, num horizonte temporal de vários anos. Estas limitações motivaram, no final dos anos 90 do século XX, o desenvolvimento sistemas terrestres na observação de pontes, edifícios e encostas [Tarchi (1997)]. Neste âmbito têm particular interesse os sistemas radar com capacidade de visão não-óptica²³: (i) RAR – *Real Aperture Radar*; (ii) SAR – *Synthetic Aperture Radar*; (iii) InSAR – *Interferometric Synthetic Aperture Radar*.

A resolução atribuída a um sistema radar constitui uma característica relevante, visto que determina a menor distância de discriminação entre dois objetos. No caso dos sistemas radar do tipo RAR, a resolução típica obtida (limitada pela dimensão da antena) torna adequada a sua utilização apenas em observações terrestres e aéreas, pelo que se recorre exclusivamente a sistemas radar do tipo SAR no caso de observações espaciais. Nota-se, também, que este tipo de sistema de radar é caracterizado por um maior nível de exatidão, sobretudo, quando conjugado com técnicas interferométricas, dando origem aos sistemas InSAR.

Os sistemas mencionados têm por princípio de medição, a determinação do tempo de percurso de um impulso de radiação eletromagnética polarizada com reduzida largura de banda centrada num valor de frequência das micro-ondas, em regra, compreendida entre 300 MHz e 30 GHz. A reflexão do impulso numa superfície origina a sua dispersão por múltiplas direções, nomeadamente, na direção da antena do sistema radar que previamente emitiu o impulso, tornando possível o registo digital do sinal de eco. A determinação da distância entre a antena e a superfície de reflexão é possível, deste modo, tendo em consideração a medição do tempo de percurso emissão/receção e a utilização do valor da constante da velocidade de propagação da luz.

²³ Existem igualmente sistemas radar sem capacidade de visão não-óptica: (i) para medição de distâncias planimétricas e altimétricas (usuais no contexto da Meteorologia e do controlo de tráfego aéreo); (ii) para medição de velocidade de objetos móveis; (iii) para medição de difusão atmosférica.

No contexto da observação terrestre, a diferença fundamental entre os sistemas RAR e SAR reside no facto de os sistemas SAR recorrerem ao efeito Doppler (desvio de frequência) observado entre os sinais emitido e recebido, em resultado do movimento do sistema radar instalado numa plataforma móvel, conforme ilustrado nas Figuras 2.40 [Crosseto (2009)] e 2.41 [IDS (2014)].



*Figuras 2.40 e 2.41: Observação terrestre de infraestruturas com recurso a radar
tipo RAR (à esq.) e tipo SAR (à dir.).*

Nos sistemas radar do tipo SAR, o desvio de Doppler é traduzido num aumento da frequência do sinal recebido em relação à frequência original do sinal emitido, no caso de pontos localizados à frente do sistema móvel radar na direção do movimento do sistema e reciprocamente, ou seja, pontos localizados atrás do sistema móvel na direção do movimento dão origem a sinais refletidos com menor frequência do que o sinal inicial. Deste modo, é possível criar uma imagem não-óptica da região observada a partir de múltiplas visualizações segundo diferentes orientações, ordenadas segundo a frequência, obtendo-se um resultado similar ao produzido pela utilização de uma antena de dimensão efetiva igual à largura do feixe, justificando o termo *synthetic*.

Enquanto os sistemas SAR fazem uso da informação da frequência do sinal de radar recebido, os sistemas InSAR recorrem à componente suplementar de fase para a realização de medições dimensionais suportadas no fenómeno da interferometria, numa ordem de grandeza da fração do comprimento de onda da radiação utilizada.

Para tal, promove-se a emissão de uma onda contínua com largura de banda na gama das micro-ondas, sendo possível efetuar o seu varrimento discreto. Para cada

posição da antena montada numa plataforma móvel e para cada passo de frequência da largura de banda, é determinada a amplitude e a fase do sinal recebido na antena. A inclusão das contribuições de sinal obtidas pelo varrimento espacial e espectral do sistema permite construir uma imagem holográfica caracterizada por uma resolução dimensional²⁴ e angular²⁵ que determina a capacidade do sistema para discriminar objetos individuais (alvos, por exemplo) no campo de visão holográfico [Pieraccini (2004)]. Cada elemento (píxel) da imagem holográfica contém informação independente relativa à amplitude (depende da refletividade da superfície observada) e à fase, diretamente relacionada com a distância entre a antena do radar e a superfície, tendo metade do comprimento de onda da radiação como referência da unidade de medida.

Note-se que o recurso a uma única imagem não permite estimar a distância em relação à região observada visto que o valor medido da fase é afetado por um termo aditivo (associado à instrumentação e à antena utilizada) de difícil determinação experimental. Como a medição de distância entre a antena do radar e a superfície refletora está limitada a metade do comprimento de onda utilizado, apenas é possível avaliar frações deste valor, originando o que se designa por ambiguidade fundamental, visto não ser possível distinguir entre distâncias superior e inferior a este valor²⁶.

A análise de diferença de fase (píxel a píxel) num par de imagens adquiridas segundo condições experimentais idênticas, permite que se construa um interferograma, no qual, assumindo que as propriedades dielétricas da superfície se mantêm constantes, se determina o seu deslocamento com base no conhecimento da velocidade da luz, na frequência central de varrimento, no ângulo entre a direção de observação e a direção do

²⁴ Depende da largura de banda de micro-ondas adoptada, verificando-se que valores elevados de largura de banda conduzem a uma melhor resolução.

²⁵ Depende da frequência central da largura de banda de micro-ondas utilizada e da amplitude do varrimento linear do radar, obtendo-se uma melhor resolução angular com o aumento da magnitude destas variáveis.

²⁶ Na observação de estruturas, esta ambiguidade pode ser ultrapassada com base no conhecimento do comportamento dimensional da estrutura observada quando não são esperados deslocamentos superiores a metade do comprimento de onda ou é possível aplicar técnicas de decomposição visando o cálculo do valor efetivo da fase.

deslocamento e na diferença de fase. O desvio de frequência produzido por efeito Doppler apresenta um reduzido impacto na incerteza de medição do deslocamento face à contribuição relativa à medição de fase e à velocidade de propagação da luz, que é afetada pela variação do índice de refração do meio (originada pelas variações de temperatura, humidade e pressão atmosférica). Deste modo, a determinação do deslocamento tridimensional com recurso a sistema InSAR necessita, no mínimo, da recolha de imagens segundo três orientações distintas ou de um conhecimento adequado da configuração geométrica do problema de medição [Pieraccini (2004)].

Embora os sistemas RAR sejam mais simples e exijam menor capacidade de processamento, a sua resolução está limitada pela dimensão da antena sendo, por essa razão, geralmente aplicados na observação de menores distâncias. O tempo de aquisição de dados em sistemas interferométricos do tipo SAR (na ordem de grandeza do minuto) torna-o adequado apenas a observações dimensionais em regime quase estático ou dinâmico de longo período, como é o caso de observação de encostas e de barragens de betão e de aterro.

No conjunto de vantagens associadas a este método de medição destaca-se:

- (i) a eliminação da necessidade de acesso à obra observada para a instalação de componentes de instrumentação (exceto quando se recorre à utilização de alvos passivos);
- (ii) a velocidade do processo de aquisição de dados;
- (iii) a portabilidade do equipamento de medição;
- (iv) a capacidade de adaptação a diferentes configurações geométricas de observação.

Este método sem contacto é particularmente útil na observação dimensional de grandes obras, onde o risco de colapso estrutural é mais elevado em virtude da ocorrência de uma situação excecional (por exemplo, um sismo) com elevado risco para a integridade humana.

Neste tipo de sistemas, a identificação de componentes de deslocamento em direções de interesse (vertical, transversal, longitudinal, radial ou tangencial) constitui uma limitação, obrigando a configurações de observação com alinhamento geométrico

rigoroso dos elementos intervenientes ou à utilização de múltiplos sistemas de medição com diferentes orientações, de forma a ser possível determinar as componentes de deslocamento na obra. A velocidade de propagação de micro-ondas é afetada pelo índice de refração do meio atmosférico, ou seja, variações temporais e espaciais de temperatura, humidade e pressão atmosférica contribuem para a incerteza de medição do deslocamento.

2.3.4.3 Medição com sistemas laser

O desenvolvimento tecnológico associado a sistemas laser permitiu a sua aplicação no contexto da observação dimensional de grandes obras [Anderson (2006)]. O princípio de medição deste tipo de sistemas é suportado no fenómeno de propagação atmosférica de um feixe laser a longa distância, estabelecendo uma linha de visão de referência entre o elemento emissor – fonte laser – e o elemento recetor – detetor optoeletrónico (vide Figura 2.42) [NOPTEL (2014)].

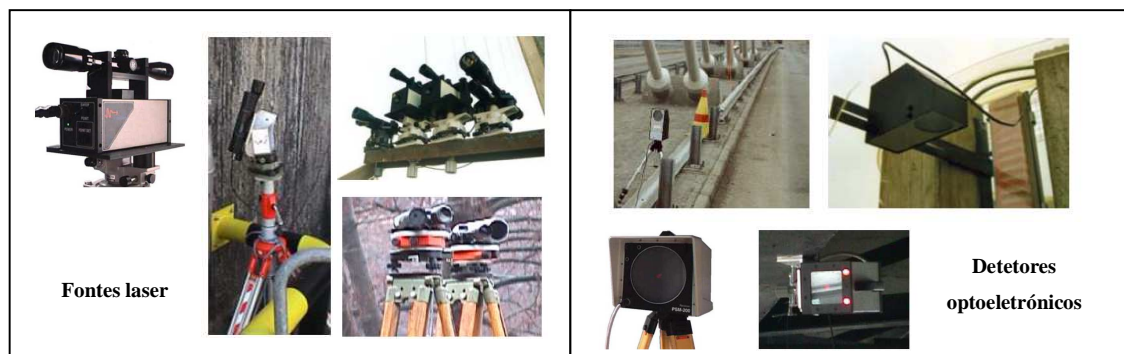


Figura 2.42: Exemplos de elementos de sistemas laser para medição de deslocamentos em obras de grande dimensão.

Através de um correto alinhamento geométrico entre ambos os elementos, o feixe laser atinge a área sensível do recetor permitindo a medição das coordenadas associadas ao ponto de incidência pelo que, posteriores alterações de posição deste ponto serão representativas do deslocamento que se pretende observar, identificando-se duas variantes do método de medição: (i) o elemento detetor está instalado na região da estrutura que se pretende observar, enquanto a fonte laser está posicionada numa região estática; (ii) ambos os elementos constituintes (detetor e laser) do sistema estão

posicionados em regiões estáticas, promovendo-se a instalação de um alvo refletor na região observada da estrutura que garante o retorno do feixe laser para o detetor.

Nas soluções comerciais disponíveis para concretização deste método de medição dimensional verifica-se que a distância máxima de observação pode atingir 600 metros, dependendo das condições atmosféricas existentes em contexto operacional. A frequência de aquisição varia entre 100 Hz e 500 Hz, estando a gama de medição dependente da área sensível do recetor optoeletrónico que, em regra, está compreendida entre 100 mm e 200 mm. O Quadro 2.8 apresenta algumas aplicações de sistemas laser à observação dimensional terrestre de grandes obras.

Quadro 2.8: Aplicações de sistemas laser na observação dimensional em obras.

			
Ponte atirantada Skarnsundet (Noruega)	Ponte atirantada Raippaluoto (Finlândia)	Ponte sobre o rio Huron Michigan (EUA)	Chaminé de central térmica (Finlândia)
Observação contínua de deslocamentos das torres em regime estático e dinâmico na entrada ao serviço e nos dois primeiros anos de exploração [Anderson (2006)]	Medição de deslocamento vertical e horizontal durante a construção do vão principal para avaliação do efeito de betonagem e ação do vento [NOPTTEL (2014)]	Medição pontual de deslocamento vertical e horizontal da viga de rigidez sob ação de tráfego rodoviário [NOPTTEL (2014)]	Observação contínua do deslocamento horizontal do topo da chaminé durante dois meses para avaliação da resposta estrutural face à ação do vento [NOPTTEL (2014)]

Na sua aplicação em cenário de observação dimensional a longa distância identificam-se os seguintes constrangimentos:

- (i) dificuldade no alinhamento geométrico dos elementos constituintes (fonte emissora, alvo refletor e detetor) que garanta uma medição rigorosa das componentes de deslocamento horizontal e vertical;

- (ii) a observação de deslocamentos de grande amplitude (superior a um metro, por exemplo) implica o recurso a detetor optoeletrónico com área sensível de elevada dimensão;
- (iii) em determinados cenários operacionais é necessário corrigir a trajetória do feixe laser em resultado do fenómeno de refração atmosférica;
- (iv) a operacionalidade do sistema de medição pode ser afetada por fenómenos atmosféricos, nomeadamente, por ocorrência de nevoeiro ou chuva intensa.

Os sistemas laser descritos anteriormente asseguram uma observação dimensional discreta de um número limitado de pontos da obra. Quando se pretende obter uma visão global do comportamento dimensional de uma grande obra, é também possível recorrer a outro tipo de sistema laser – os sistemas de varrimento laser terrestre ou TLS – *Terrestrial Laser Scanning* – com origem no domínio da Detecção Remota com sistemas LIDAR²⁷.

Numa fase inicial, este tipo de sistemas de medição tornou-se, no contexto da Engenharia Civil, numa solução atrativa para a medição bidimensional de perfis de obras geotécnicas, nomeadamente, em minas e túneis, evoluindo com o desenvolvimento computacional dos anos 90 do século XX, para sistemas de medição tridimensional.

Estes sistemas permitem recolher nuvens de pontos representativas da superfície de grandes obras como barragens de betão e de aterro [Berberan (2011)] ou da superfície terrestre, com particular interesse em Topografia. Com os atuais recursos computacionais disponíveis, é possível promover a determinação de milhares de pontos de medição por segundo, passíveis de representação gráfica digital nas vertentes dimensional (posição dos pontos), radiométrica (intensidade do sinal recebido) e fotométrica (componentes RGB).

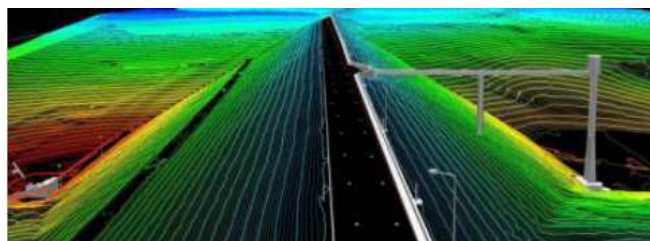
²⁷ Os sistemas LIDAR podem ser divididos em quatro categorias consoante o elemento de instalação do sistema de varrimento laser: terrestre (tripés e outras plataformas terrestres fixas); aéreo (aviões ou helicópteros); espacial (satélites); móvel (veículos de transporte).

O princípio de medição é suportado na determinação da distância de percurso de emissão, reflexão e retorno de um feixe laser em regime contínuo ou pulsado mediante o recurso a um dos seguintes métodos:

- (i) TOF – *Time Of Flight*, no qual se promove a medição direta do tempo de percurso do sinal;
- (ii) comparação de fase entre sinais emitido e refletido;
- (iii) triangulação, mediante conhecimento das coordenadas de pontos de referência sujeitos a varrimento.

No contexto da observação terrestre de obras de elevada dimensão, o método TOF é o mais comum atendendo à sua capacidade de varrimento de grandes áreas, embora apresente maior morosidade e menor exatidão quando comparado com os restantes métodos de medição.

Este tipo de sistemas de medição estão, habitualmente, instalados no topo de tripés de observação (*vide* Figura 2.43) [Almeida (2011)], estando os elementos radiométricos e fotométricos associados a uma cabeça rotativa que assegura a sua movimentação controlada segundo um eixo vertical possuindo, adicionalmente, um espelho rotativo montado num eixo horizontal. Deste modo, garante-se o varrimento horizontal completo (360°) e vertical (entre 80° e 90°) da estrutura observada com o feixe laser. Ambos os eixos mencionados estão associados a goniómetros eletrónicos de elevada exatidão que permitem determinar a orientação do sistema de varrimento.



Figuras 2.43 e 2.44: Sistema de varrimento laser (à esq.) e exemplo de modelo digital obtido para uma barragem de aterro (à dir.).

Complementarmente, o sistema de medição pode incluir uma máquina fotográfica digital de elevada resolução espacial que garante o registo visual das regiões varridas, assistindo a atividade de inspeção visual na deteção de fenómenos anómalos (fendas, depósitos, fugas, erosão, entre outros), permitindo atribuir cor e textura às representações gráficas das superfícies criadas computacionalmente a partir da nuvem de pontos recolhidos, tornando-as bastante próximas da realidade.

No conjunto de aplicações deste tipo de sistema de medição dimensional em Engenharia Civil destacam-se:

- (i) a observação de barragens de betão (*vide* Figura 2.44) [Oliveira (2011)] e de aterro tendo em vista a avaliação da sua deformação em horizonte temporal alargado, a identificação de patologias superficiais e o registo topográfico da região envolvente (encostas e encontros);
- (ii) a observação de obras geotécnicas visando a avaliação da estabilidade dimensional de minas, túneis, grutas e encostas a longo prazo;
- (iii) a avaliação de conformidade dimensional de edifícios com formas geométricas complexas;
- (iv) a caracterização dimensional de pavimentos rodoviários.

Os sistemas de varrimento laser apresentam como principais vantagens a capacidade de adquirir diretamente, sem contacto, em regime diurno ou noturno e a longa distância (até 500 m, na maioria dos equipamentos comercializados), as coordenadas tridimensionais de milhares de pontos na superfície global de obras de grande dimensão, com uma exatidão similar à obtida, de forma discreta e com maior morosidade, com métodos geodésicos.

O elevado esforço computacional associado ao processamento e cálculo dos pontos medidos numa campanha de medição (embora permita realizar varrimentos localizados numa superfície com reduzida dimensão na obra), tornam este tipo de sistema de medição ainda pouco atrativo à observação contínua em tempo real.

2.3.4.4 Medição óptica

A observação dimensional terrestre com recurso a sistemas ópticos constitui uma solução atrativa no conjunto de métodos de medição emergentes, nomeadamente, em relação aos sistemas GNSS e radar interferométrico pelo facto de não ser afetado pelo fenómeno de múltiplas reflexões eletromagnéticas em obra. A sua aplicação é particularmente interessante ao nível da observação de pontes suspensas (*vide* Quadro 2.9) [Wikipedia (2014)] com vão principal de elevada dimensão (superior a 1000 m), caracterizadas por uma elevada flexibilidade dando origem a deslocamentos de amplitude significativa, por vezes, superiores a um metro. Este tipo de infraestrutura apresenta, em regra, uma viga de rigidez composta por múltiplos elementos estruturais metálicos que contribuem para o indesejável efeito de múltiplas reflexões eletromagnéticas referido anteriormente.

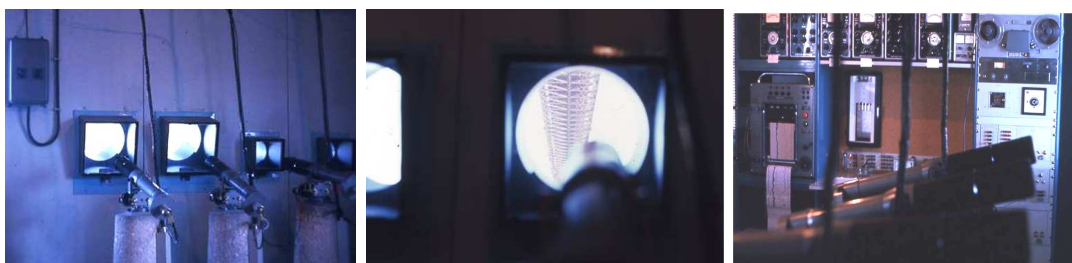
Quadro 2.9: Exemplos de pontes sujeitas a observação dimensional por via óptica.

 <p>Ponte suspensa 25 de Abril Lisboa (Portugal)</p>	 <p>Ponte suspensa Humber Kingston upon Hull, Inglaterra, (RU)</p>	 <p>Ponte atirantada 2nd Severn Crossing País de Gales / Inglaterra, (RU)</p>
 <p>Ponte ferroviária de arco metálico Huta Zawadzka (Polónia)</p>	 <p>Ponte suspensa Vincent Thomas San Pedro (Califórnia, EUA)</p>	

Atendendo à temática em estudo, promove-se na presente secção uma descrição detalhada de sistemas de medição óptica aplicados na observação dimensional terrestre de infraestruturas, desde uma fase primitiva, optoeletromecânica, dos anos 60 do século XX até à atualidade, beneficiando do progresso tecnológico decorrido, nomeadamente, o aparecimento da câmara digital e a evolução do processamento computacional de

imagens. Os sistemas descritos baseiam-se no princípio de medição dimensional suportado na propagação da luz entre alvos colocados em regiões de interesse da infraestrutura observada e dispositivos de formação e análise de imagens dos alvos de modo a poder extrair da observação a informação dimensional.

Numa perspetiva histórica considera-se relevante destacar o sistema de medição desenvolvido pelo LNEC e integrado na observação estrutural de longo prazo da P25A²⁸, entre 1966 e 1977 (*vide* Figuras 2.45 a 2.47), visando a medição de deslocamentos verticais e transversais do vão principal (com comprimento total de 1013 m) da viga de rigidez a $\frac{1}{2}$ vão e a $\frac{1}{4}$ vão [Marécos (1969)].



Figuras 2.45 a 2.47: Central de observação óptica na fundação da torre norte (P4) da P25A (1966-1977).

Conforme se expõe na Figura 2.48 [Marécos (1969), Santos (2011)], tratava-se de um sistema optoeletromecânico composto por alvo ativo instalado na região inferior da viga de rigidez, promovendo a emissão de um feixe luminoso concentrado de radiação infravermelha em direção à fundação da torre sul, na qual se encontrava um sistema de observação formado por:

- (i) um sub-sistema optoeletrónico contendo
 - a. filtro óptico – correspondia a um filtro passa-alto que eliminava a radiação ambiente com comprimento de onda inferior ao comprimento de onda de infravermelho melhorando, deste modo, a capacidade de observação do alvo ativo;

²⁸ Desde a sua inauguração em 1966 até 1974, esta ponte suspensa foi formalmente designada por Ponte Salazar.

- b. objetiva com elevada distância focal, próxima de 640 mm;
 - c. filtro mecânico – com a função de assegurar que o sensor óptico apenas recebia radiação durante um reduzido intervalo de tempo, devidamente sincronizado com o pico de emissão do alvo estando, por isso, sincronizado com a frequência da tensão elétrica de alimentação do alvo (mediante associação a motor de indução);
 - d. sensor óptico – constituído por uma ponte de quatro fotodíodos com sensibilidade espectral elevada para a radiação infravermelha (emitida pelo alvo);
- (ii) um sub-sistema mecânico servocontrolado – permitindo a instalação do sub-sistema óptico e a sua rotação em torno de dois eixos ortogonais (horizontal e vertical) de modo a garantir o seu alinhamento geométrico com o alvo.

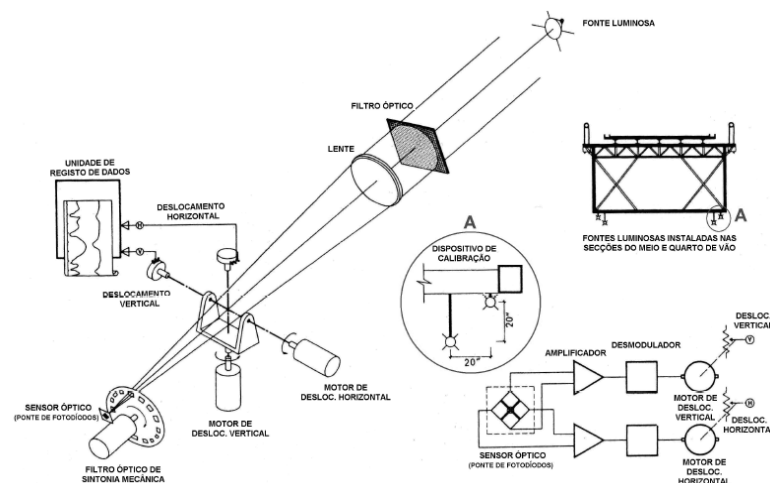


Figura 2.48: Representação esquemática do sistema optoeletromecânico da P25A (1966-1977).

O sistema completo dispunha de quatro sistemas optoeletromecânicos visando a observação de quatro alvos distribuídos pelos lados montante e jusante das secções de $\frac{1}{2}$ vão e $\frac{1}{4}$ vão do vão principal. Salienta-se que, cada um dos alvos mencionados, estava associado a um segundo alvo idêntico ao primeiro e afastado, aproximadamente, 0,5 m

dos níveis horizontal e vertical, sendo utilizado para parametrização do sistema e como alvo suplente em caso de avaria do alvo principal.

A parametrização do sistema era efetuada alinhando o sistema de observação com o primeiro alvo iluminado estando o segundo desligado e, reciprocamente, sendo realizada a medição da respetiva variação angular do sistema de observação segundo os eixos vertical e horizontal. O conhecimento da distância vertical e horizontal entre alvos suportava a determinação da relação entre a variação angular lida no sistema de observação e o deslocamento da ponte.

A contribuição importante deste estudo do LNEC permitiu, a partir dos dados recolhidos através deste sistema, relacionar a ação da pressão dinâmica do vento com a amplitude dos deslocamentos horizontais observados a $\frac{1}{4}$ vão e $\frac{1}{2}$ vão, bem como extrair características dinâmicas da estrutura, nomeadamente, os primeiros modos de vibração natural transversal e vertical.

Também no contexto da observação de pontes suspensas de elevada dimensão salienta-se, no início dos anos 90 do século XX, a aplicação de um sistema óptico de elevada distância focal [Stephen (1993)] incluindo uma câmara de vídeo analógica do tipo *off-the-shelf* na ponte suspensa Humber com um vão principal de 1410 metros, visando a medição do seu deslocamento vertical e transversal. Neste sistema, a câmara de vídeo foi instalada numa das fundações das torres da ponte suspensa (considerada como uma região estática) e orientada em direção a um alvo passivo – composto por dois anéis concêntricos de material refletor numa placa quadrada (40 cm \times 40 cm) com fundo negro – colocado na viga de rigidez, conforme ilustrado na Figura 2.49 [Stephen (1993)]. A diagonal do alvo permitia a parametrização do sistema de medição pela relação entre o deslocamento e a variação de coordenadas do alvo na imagem.

Neste sistema, a câmara de vídeo possuía uma objetiva de elevada distância focal (800 mm) associada a um duplicador óptico, permitindo obter um campo de visão (FOV) próximo de 2,17 m e uma frequência de aquisição de imagem (256 \times 256 píxeis, 8 bits) de 25 Hz. A determinação de coordenadas do alvo era suportada em processamento digital de imagem com recurso à técnica de correlação de imagem por *template matching*.

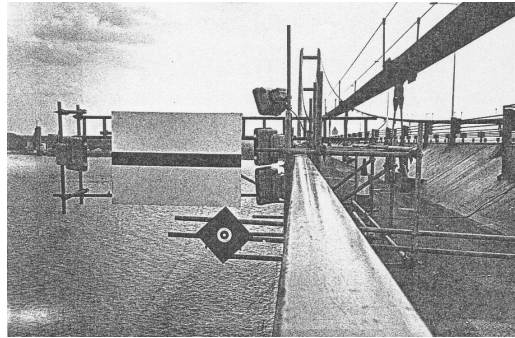


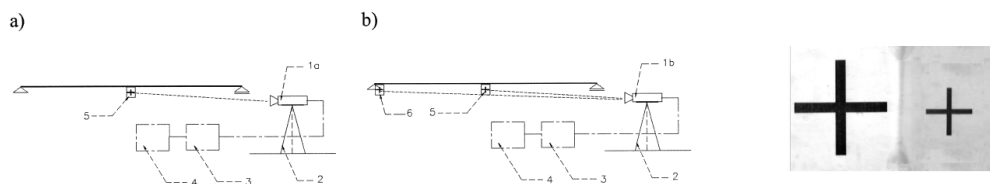
Figura 2.49: Alvo passivo instalado na ponte suspensa Humber.

Embora as imagens obtidas fossem afetadas por perturbações do meio de propagação [Stephen (1993)], o sistema óptico utilizado na ponte suspensa Humber permitiu determinar as frequências de vibração natural mais reduzidas (primeiros modos de 0,054 Hz e 0,115 Hz nas direções transversal e vertical, respetivamente), com estimativas bastante próximas das obtidas por registo temporal de acelerações tendo contribuído para a melhoria do conhecimento do comportamento dinâmico face a solicitações de natureza térmica e aerodinâmica. No final da década de 90 do século XX, o referido sistema foi adaptado para a observação dimensional da Ponte Second Severn Crossing (Reino Unido) [Macdonald (1997)].

Em [Olaszek (1999)] apresenta-se o desenvolvimento de um sistema óptico de visão computacional aplicado à observação dinâmica de pontes, composto por uma câmara com sensor CCD (512×512 píxeis, 8 bits) e objetiva com elevada distância focal, sendo suportado na observação de alvo passivo (cruz negra em fundo branco) e recorrendo a dois métodos de medição distintos, conforme ilustrado nas Figuras 2.50 e 2.51 [Olaszek (1999)].

Na primeira abordagem (a) é utilizado apenas um alvo de medição colocado no $\frac{1}{2}$ vão da ponte em virtude da acentuada amplitude de deslocamento verificada, em regra, nesta região, recorrendo-se a câmara com uma teleobjetiva caracterizada por uma distância focal de 1000 mm o que, segundo [Olaszek (1999)] e com base na referida câmara CCD, permite estabelecer distâncias de observação compreendidas entre 10 m e 100 m para a medição de deslocamento vertical numa gama compreendida entre 50 mm e 500 mm. Note-se que o nível de exatidão obtido por concretização desta configuração é afetado

negativamente pela presença de vibrações na câmara (por exemplo, por ação do vento), tendo motivado o desenvolvimento da segunda abordagem.



Legenda: a – abordagem com um alvo de medição; b – abordagem com dois alvos (de medição e de referência); 1a – câmara com uma teleobjetiva; 1b – câmara com duas teleobjetivas; 2 – estrutura de montagem da câmara; 3 – computador e digitalizador de imagem; 4 – monitor; 5 – alvo de medição; 6 – alvo de referência.

Figuras 2.50 e 2.51: Configurações geométricas do processo de medição óptica (à esq.) e imagem dos alvos passivos de referência e medição na configuração b (à dir.).

Na abordagem (b) é adicionado um segundo alvo de referência situado na base de um pilar numa região que se considera estática (localizado a 50 m de distância da câmara) e cuja observação é realizada em simultâneo com o alvo de medição instalado a $\frac{1}{2}$ vão (com o qual se estabelece uma distância de observação de, aproximadamente, 25 metros). A aquisição simultânea dos dois alvos numa única imagem é assegurada através de dispositivo óptico dedicado (de uso não-corrente) composto por duas teleobjetivas com 500 mm de distância focal, tornando possível a determinação da correção da posição do alvo de medição por efeito de vibração do dispositivo de observação. Desta forma melhora-se o nível de exatidão da medição dimensional.

O estudo realizado por [Olaszek (1999)] refere, ainda, o procedimento de processamento digital de imagem do alvo visando a determinação do seu centro geométrico, tendo em conta uma frequência de aquisição de 25 imagens por segundo durante um período de tempo de 30 segundos. São mencionados dois exemplos (observação dimensional de duas pontes com vão principal de 33 m e 75 m) de aplicação das abordagens propostas e os respetivos resultados obtidos. No caso do ensaio de campo para aplicação da abordagem com dois alvos, foi possível efetuar uma comparação com os resultados complementares obtidos através de medição por contacto, tendo-se obtido desvios máximos de 1,6 mm (sem correção da vibração da câmara) e 0,1 mm (com correção) entre cadeias de medição.

Salienta-se que [Olaszek (1999)] efetua uma análise de erro do sistema proposto orientada segundo uma perspetiva clássica de natureza determinística, procurando quantificar experimentalmente as componentes de erro identificadas mediante a avaliação dos limites de variabilidade do sistema face a alterações induzidas individualmente para cada componente. Do conjunto de fontes de erro referidas, destacam-se: (i) a parametrização do sistema (baseada em características dimensionais do alvo); (ii) a forma geométrica do alvo utilizado; (iii) as condições de iluminação; (iv) a influência do índice de refração do ar na direção de propagação da luz; (v) a distorção da imagem originada por efeito optoeletrónico; (vi) o comportamento dinâmico do referencial adotado; (vii) a aquisição e o processamento digital, nomeadamente, no que respeita à frequência de aquisição adotada.

Outro sistema óptico de visão computacional visando a observação dimensional de uma ponte suspensa em regime dinâmico foi proposto por [Wahbeh (2003)] motivado possivelmente pelas conhecidas limitações práticas evidenciadas quer pela instrumentação mais convencional (acelerómetros e sistemas elétricos de medição dimensional linear) quer por mais recentes tecnologias, nomeadamente, associadas aos sistemas de medição suportados em sistemas GNSS para esta finalidade. Relativamente aos sistemas ópticos mencionados, a abordagem proposta possui como aspetos diferenciadores:

(i) a utilização de alvo ativo composto por dois LEDs instalados numa placa com fundo negro (*vide* Figura 2.52) [Wahbeh (2003)] e cuja distância mútua é conhecida, permitindo a determinação de um fator de escala entre a contagem de píxeis e o deslocamento na fase inicial de parametrização do sistema nos primeiros 15 segundos do registo (durante a medição de deslocamento apenas um LED permanece ativo);

(ii) a instalação de câmara digital a $\frac{1}{2}$ altura numa das torres de ponte suspensa, orientada em relação ao referido alvo colocado na região inferior da secção central do vão principal.



Figura 2.52: Alvo ativo instalado na ponte suspensa Vincent Thomas.

Esta abordagem foi concretizada na ponte suspensa Vincent Thomas localizada na Califórnia (EUA) e com vão principal de 457 m, tendo-se promovido a aquisição de imagens de (520×450) píxeis com uma frequência de amostragem de 30 Hz, as quais foram posteriormente sujeitas a processamento digital (filtragem e ajuste gaussiano não-linear da mancha luminosa do LED). O registo temporal de deslocamento da ponte a $\frac{1}{2}$ vão permitiu determinar duas frequências de vibração natural dominantes (a 0,23 Hz e 0,36 Hz), bastante próximas das obtidas pelo registo temporal de aceleração (note-se que a referida ponte está instrumentada com uma rede de 26 acelerómetros distribuídos pelos seus componentes estruturais).

No entanto, esta atividade experimental revelou algumas fragilidades, nomeadamente, o facto de a câmara instalada a $\frac{1}{2}$ altura da torre estar sujeita à influência das ações dinâmicas induzidas pelo tráfego rodoviário. Neste sentido, os autores referem como perspectivas de evolução futura, a instalação da câmara numa zona com menor influência de ações dinâmicas, a utilização de uma câmara com maior número de píxeis, bem como, a realização de estudos relativos à orientação angular da câmara (para evitar erros de projecção) e a utilização de LEDs com largura de banda e intensidade de emissão variável tendo por objetivo a diminuição da influência do ambiente circundante (chuva, nevoeiro, luz natural) na qualidade das imagens captadas.

Em [Lee (2006)] descreve-se uma abordagem óptica de visão computacional visando a medição do deslocamento em tempo real em pontes suspensas, caracterizadas por baixas frequências de vibração e elevadas amplitudes de deslocamento. Na concretização desta abordagem [Lee (2006)] recorre-se a uma câmara digital do tipo *off-the-shelf*, equipada com teleobjetiva para a observação de um alvo passivo composto

por quatro pontos circulares brancos colocados sobre um fundo negro, conhecendo-se o distanciamento vertical e horizontal entre pontos extremos, sendo usado para parametrização e medição. Na configuração geométrica proposta, a câmara está localizada num ponto fixo (estático), por exemplo, numa margem ou ancoragem, estando o alvo posicionado na região de interesse na ponte observada sendo possível a sua iluminação de forma artificial. De acordo com [Lee (2006)], a referida configuração de medição, conjugada com as características da câmara e do alvo propostos, asseguram o estabelecimento de distâncias de observação que podem atingir várias centenas de metros.

A etapa de processamento digital das imagens adquiridas (com 720×480 pixéis) inclui operações de reconhecimento e projeção dos pontos circulares, sendo o deslocamento calculado a partir da variação das coordenadas do alvo na imagem e do conhecimento de matriz de rotação, e dos fatores de escala vertical e horizontal determinados com base numa relação dimensional e geométrica entre os pontos circulares que compõem o alvo. A frequência de aquisição de imagem situa-se nos 30 Hz, o que se considera adequado face às reduzidas frequências de vibração observadas em pontes suspensas de grande vão principal (tipicamente inferiores a 1 Hz), salientando-se que apenas um dos pontos circulares do alvo é usado para medição em tempo-real, o que torna o processo de cálculo dimensional bastante mais rápido.

No que se refere à validação experimental da abordagem proposta em [Lee (2006)], este descreve a realização de ensaios de campo em dois viadutos com vão principal de reduzida dimensão (em torno de 40 m) efetuando a medição por contacto e com vibrómetro laser, tendo sido obtidas estimativas de deslocamento com magnitude similar entre as três cadeias de medição aplicadas, bem como, frequências de vibração natural próximas. É, ainda, descrita a aplicação desta abordagem óptica a uma ponte pedonal suspensa (*vide* Figura 2.53) [Lee (2006)] com vão principal de 120 m, tendo-se estabelecido uma distância de observação de, aproximadamente, 70 m. A estimativa da primeira frequência em vibração natural obtida com base no registo de deslocamento do alvo foi praticamente idêntica à obtida por via de registo acelerométrico obtido em simultâneo com a aquisição de imagens.



Figura 2.53: Ponte suspensa sujeita a observação por meios ópticos.

Por último, destaca-se o estudo aprofundado realizado por [Santos (2011)] no LNEC centrado na conceção e desenvolvimento de um sistema óptico de visão computacional dedicado à medição do deslocamento vertical e transversal de pontes suspensas ou atirantadas. No conjunto de temáticas abordadas destacam-se os seguintes aspetos:

- (i) o estudo da propagação de ondas eletromagnéticas na camada atmosférica próxima da superfície terrestre (altitude inferior a 1 km), em particular, dos fenómenos de turbulência e de atenuação atmosférica [Santos (2007-b)], tendo em vista a otimização do comprimento de onda associado ao alvo ativo que assegure uma disponibilidade operacional elevada do sistema medição e a sua compatibilidade espectral com câmaras digitais do tipo *off-the-shelf*;
- (ii) aplicação de projeção ortogonal na modelação geométrica do processo de formação de imagem em câmara com objetiva de elevada distância focal (600 mm) e desenvolvimento do respetivo processo de parametrização intrínseca e extrínseca *in situ*, suportada no conjunto de alvos do sistema de medição instalados na estrutura dinâmica observada e no conhecimento das coordenadas relativas entre alvos, desconhecendo-se a posição da câmara e dos alvos num sistema de coordenadas mundo;
- (iii) a definição de processo de estimação da trajetória de movimento dinâmico da estrutura, por meio de filtro recursivo, tendo por objetivo a predição da projeção dos alvos nas imagens imediatamente antes da sua aquisição, permitindo reduzir a área da imagem sujeita a processamento digital e, consequentemente, o tempo de computação associado;

- (iv) a simulação computacional de cenário de observação de ponte suspensa com vão principal de elevada dimensão (1000 m) suportada em abordagem multicâmara e nos processos descritos nos pontos (ii) e (iii), tendo por objetivo a avaliação do efeito de perturbações associadas às coordenadas dos alvos na imagem, da configuração geométrica e do número de componentes (câmaras e alvos), no desempenho do sistema (estabilidade e exatidão do processo de medição proposto);
- (v) o estudo nas vertentes geométrica e radiométrica de um alvo ativo composto por linhas e colunas de LEDs (*vide* Figuras 2.54 e 2.55) [Santos (2011)] com comprimento de onda na gama do infravermelho próximo; este estudo incluiu a aquisição de imagens reais do alvo ativo a longa distância (em torno de 500 m) com ajuste variável do tempo de exposição da câmara e da intensidade de corrente no alvo, tendo por objetivo avaliar o seu impacto na qualidade das imagens obtidas e a capacidade de resposta do sistema a alterações das condições de visibilidade que frequentemente ocorrem em cenário de observação real;

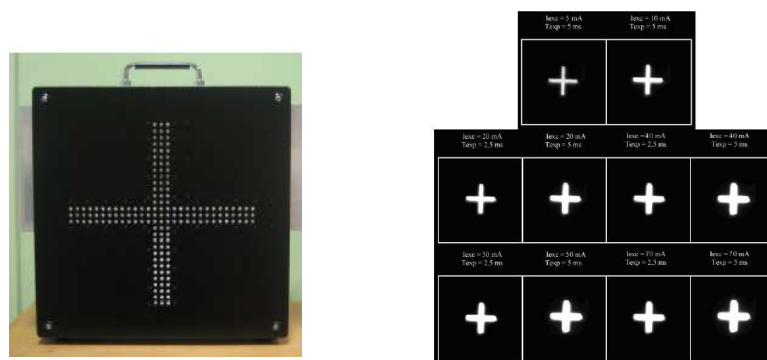
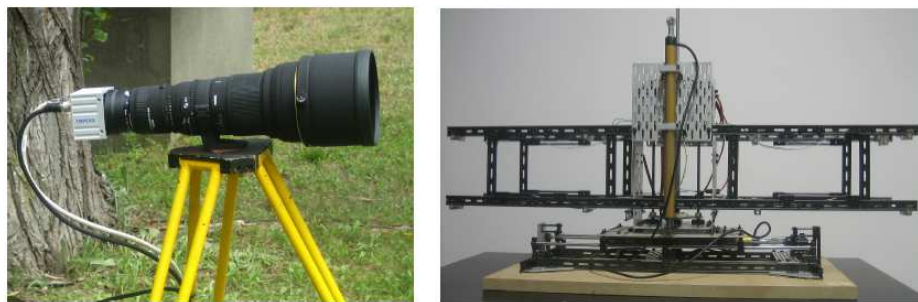


Figura 2.54 e 2.55: Geometria do alvo ativo (à esq.) e exemplos de imagens do alvo obtidas no ensaio de observação a longa distância (à dir).

- (vi) a realização de ensaios de campo em ambientes exterior e interior com sistema óptico em configuração estereoscópica e escala reduzida (distâncias de observação de 90 m e 50 m, respetivamente) visando a determinação experimental dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos do sistema mediante o processo referido em (ii) e a quantificação dos desvios na medição de

deslocamento transversal e vertical do conjunto de LEDs integrando cadeias de medição dimensional próprias (*vide* Figuras 2.56 e 2.57) [Santos (2011)].

As simulações computacionais e os ensaios de campo referidos mostraram que os métodos de parametrização, seguimento e medição propostos apresentam uma estabilidade numérica adequada a cenários com perturbações ambientais significativas, constituindo uma solução promissora para a observação dimensional terrestre de infraestrutura em regime dinâmico. Face aos resultados obtidos [Santos (2011)] propõe para o problema da observação dimensional a longa distância de pontes suspensas ou atirantadas, a utilização de, no mínimo, quatro alvos ativos (com coordenadas relativas conhecidas) visíveis para cada uma das duas câmaras colocadas em fundações das torres opostas numa configuração do tipo estereoscópica.



Figuras 2.56 e 2.57: Câmara digital com objetiva de elevada distância focal (à esq.) e estrutura com alvos ativos e cadeias de medição vertical e horizontal (à dir.).

2.3.5 Medição dimensional indireta com recurso a registos temporais de aceleração

Numa perspetiva matemática, é possível efetuar a determinação por via indireta da evolução temporal da posição de um ponto com base no correspondente registo temporal da sua aceleração mediante a aplicação de um método numérico de integração dupla. Contudo, a concretização real deste método indireto de medição dimensional em obras de elevada dimensão apresenta significativas limitações, nomeadamente, no que diz respeito ao desconhecimento de condições iniciais de posição ou velocidade e a presença de deriva, instabilidade térmica e ruído nos acelerómetros na gama das baixas frequências (inferiores a 1 Hz), o qual é amplificado por ação da integração numérica, prejudicando severamente o nível de exatidão dimensional, sobretudo, quando se consideram longos

períodos de tempo de observação. Este último aspeto é particularmente relevante no caso de obras com elevada dimensão, caracterizadas por baixas frequências de vibração natural, como é o caso das pontes suspensas com grande vão principal.

Neste contexto, a investigação tem focado a sua atenção no desenvolvimento de procedimentos de pré-processamento dos registos temporais da aceleração, tendo por objetivo a mitigação das limitações mencionadas anteriormente. Neste âmbito [Faulkner (1996)] sugere a remoção prévia do valor médio do registo temporal da aceleração e a aplicação de filtro do tipo passa-alto com frequência de corte reduzida e menciona como aspeto crítico o estabelecimento de frequências de amostragem elevadas (superiores a 400 Hz) em acelerómetros do tipo *force balance*. Em situação de frequência de amostragem mais reduzida (em torno de 100 Hz) [Park (2005)] adota um procedimento de divisão do registo temporal de aceleração em vários segmentos, nos quais efetua pré-processamento individual de correções e estimação de condições iniciais. Neste sentido, [Wahbeh (2003)] refere a aplicação de um filtro passa-banda ao sinal de aceleração (na gama de frequência de 0,05 Hz a 30 Hz) numa fase inicial²⁹ e posteriormente ao sinal de velocidade obtido por integração simples do registo filtrado de aceleração que determina numericamente o deslocamento.

Embora os autores mencionados tenham promovido a validação experimental dos procedimentos de pré-processamento de sinal e da consequente medição indireta do deslocamento em estruturas de reduzida dimensão (onde foi possível aplicar, em simultâneo, cadeias de medição dimensional direta) ou em modelo reduzido em laboratório, todos referem a necessidade de melhorar a robustez deste processo de medição face às vulnerabilidades mencionadas, sobretudo, em contexto de observação real de infraestruturas de grande dimensão. Atualmente, no contexto da observação de infraestruturas em regime dinâmico, este método indireto de medição dimensional apresenta uma reduzida aplicabilidade em virtude do elevado risco associado.

²⁹ Obtido por aplicação de acelerómetro do tipo *force balance* com frequência de amostragem de 200-Hz.

2.4 Considerações finais

O estado do conhecimento apresentado suporta uma análise comparativa de um conjunto de soluções de medição, permitindo estabelecer requisitos associados à observação dimensional terrestre de infraestruturas em regime dinâmico. Tendo em conta a especificidade do cenário de observação de obras de grande dimensão identificam-se como requisitos principais do processo de medição dimensional os seguintes elementos:

- (i) medição em regime dinâmico, de modo a possibilitar a caracterização dinâmica da infraestrutura mediante a determinação de frequências, configurações e amortecimento de vibração numa base temporal alargada, aspeto relevante em estruturas de grande dimensão caracterizadas por baixas frequências de vibração;
- (ii) realização de medições absolutas sem necessidade de contacto, atendendo à dificuldade em encontrar pontos estáticos de referência nas imediações da região de interesse em obras de grande dimensão;
- (iii) capacidade de medição tridimensional em direções de interesse da infraestrutura (longitudinal, transversal e vertical), a nível superficial ou externo numa gama de medição que, em obras flexíveis de grande dimensão, pode atingir valores de magnitude elevada (superior a um metro, por exemplo);
- (iv) possibilidade de medição dimensional contínua, em tempo real, em diferentes regimes de observação diurna e noturna e em diferentes estações do ano;
- (v) robustez adequada à realização de observação em campo, nomeadamente, à influência de fenómenos atmosféricos (radiação solar, chuva, neve, nevoeiro, neblina, por exemplo) e eletromagnéticos (interferências com a própria obra observada e com a região envolvente e sabotagem de sinal).

No Quadro 2.10 faz-se uma apreciação da relação entre os diferentes métodos de medição e os requisitos de medição, com base na natureza da observação dimensional terrestre de infraestruturas em regime dinâmico que se pretende concretizar.

Quadro 2.10: Análise comparativa de soluções para medição dimensional em infraestruturas dinâmicas.

Método / Requisito de medição	Contacto	Nivelamento hidrostático	Fio de prumo	Medição geodésica	Fotogrametria terrestre	GNSS	Radar interferométrico	Laser	Visão computacional
Regime dinâmico	+	-	-	-	-	+	+	+	+
Medição absoluta	+	-	+	+	+	+	+	+	+
Medição sem contacto	-	-	+	+	+	+	+	+	+
Medição 3D	+	-	-	+	+	+	-	-	+
Medição superficial	+	-	-	+	+	+	+	+	+
Gama de medição dimensional elevada	-	-	-	+	+	+	+	-	+
Medição contínua em tempo real	+	+	+	-	-	+	+	+	+
Influência atmosférica	+	+	+	-	-	-	+	-	-
Reflexão eletromagnética	+	+	+	+	+	-	-	+	+

Legenda: + cumpre; - não cumpre.

A análise comparativa permite verificar que os sistemas ópticos de visão computacional constituem a solução mais adequada para o contexto metrológico em estudo, cumprindo todos os requisitos de medição estabelecidos com exceção da influência atmosférica, pois a ocorrência de fenómenos de precipitação e nevoeiro intenso constituem constrangimentos a ter em conta quer no que se refere à disponibilidade quer a limitações da exatidão das medições. Contudo, no contexto das soluções emergentes e comparativamente com outras soluções, por exemplo, sistemas laser, a sua concretização mostra-se mais vantajosa devido à gama de medição alargada que permite alcançar. Quando comparada com os sistemas GNSS e radar interferométrico, a vantagem decorre destes serem perturbados pela ocorrência de reflexões eletromagnéticas devido aos elementos estruturais metálicos que constituem as infraestruturas em observação.

O enquadramento que se apresentou constitui a base da motivação para o estudo de abordagens ópticas de visão computacional para a observação dinâmica de grandes obras em Engenharia Civil, conforme será discutido no Capítulo 3. Neste, haverá um particular ênfase nos aspetos de configuração e dimensionamento dos sistemas de medição, modelação dos elementos recetor (câmara) e emissor (alvo) e de aquisição e processamento digital de imagem. Ainda neste quadro, identifica-se como principal vulnerabilidade para a medição óptica por visão computacional – a influência atmosférica – tendo-lhe sido dedicado um estudo específico com o intuito de promover a mitigação dos efeitos perturbadores da medição.

A análise dos estudos de medição óptica aplicada à observação dimensional de infraestruturas dinâmicas revelou a necessidade de um enquadramento metrológico apropriado consentâneo com a atual abordagem suportada na análise probabilística da medição sendo este um aspeto inovador introduzido por este estudo. O Capítulo 3 apresentará a sua formulação e o Capítulo 4 descreverá a abordagem experimental desenvolvida para a sua validação, elemento fundamental do método científico.

O enquadramento metrológico do problema requer:

- (i) a caracterização metrológica da abordagem óptica proposta nas diferentes vertentes que a compõem;
- (ii) o estabelecimento de rastreabilidade dimensional ao SI com recurso a padrão de referência e método de calibração adequados ao nível de exatidão pretendido no contexto de observação;
- (iii) a determinação da incerteza de medição associada às componentes dimensionais como elemento essencial para assegurar a confiança nas medições realizadas e sustentar uma análise comparativa devidamente validada com outras soluções de medição de natureza distinta ou similar.

O trabalho desenvolvido no estudo do Estado dos Conhecimentos revelou-se fundamental para delinear as linhas orientadoras do método a desenvolver e da avaliação do seu desempenho metrológico comparado com os requisitos de qualidade das medições inerentes à aplicação pretendida.

Comparativamente com as soluções de visão computacional mencionadas neste Capítulo, a presente tese apresenta um caráter inovador na observação de infraestruturas no que respeita à abordagem óptica proposta (configuração singular com câmara móvel), dando continuidade ao desenvolvimento do conhecimento nesta área, na qual o LNEC tem assumido um papel pioneiro ao constituir uma das primeiras entidades de investigação e desenvolvimento a conceber e a concretizar com sucesso um sistema optoeletromecânico (na P25A entre 1966 e 1977).

Face aos desenvolvimentos tecnológicos entretanto ocorridos, o sistema óptico proposto recorre a componentes do tipo *off-the-shelf*, ultrapassando as limitações técnica e económica (custos elevados da produção de componentes do tipo *custom-made*) associadas a uma eventual reprodução e atualização do referido sistema optoeletromecânico aplicado no passado. Este progresso técnico (ao nível de câmaras digitais, LEDs e meios computacionais) é acompanhado pela evolução do conhecimento científico da Metrologia, que se pretende integrar e aplicar no contexto da observação dimensional terrestre de infraestruturas dinâmicas, nomeadamente, no caso estudo de uma ponte suspensa com elevado vão principal, conforme se verá no Capítulo 4.

3. METODOLOGIA ÓPTICA PARA MEDIÇÃO DIMENSIONAL DE INFRAESTRUTURAS DINÂMICAS

3.1 Introdução

O Capítulo anterior, dedicado ao estado dos conhecimentos, mostrou como a medição óptica por visão computacional constitui uma solução emergente com elevado grau de interesse para a medição dimensional de infraestruturas dinâmicas, face aos requisitos estabelecidos para este tipo de cenário de observação em Engenharia Civil. Neste Capítulo é desenvolvido o estudo do método e do sistema de medição óptica considerados mais adequados ao problema genérico de observação dimensional terrestre descrito no capítulo anterior, bem como, o respetivo enquadramento metrológico que suporta a avaliação da qualidade da medição obtida por esta via instrumental e que concretiza a necessária ligação de rastreabilidade ao SI de Unidades.

Este capítulo é iniciado com o estudo, análise e avaliação de abordagens ópticas visando esclarecer a adequação destas para a finalidade pretendida, tendo em consideração a elevada dimensão do conjunto de configurações possíveis de medição, nomeadamente, envolvendo diferentes números de câmaras e de alvos e o distinto posicionamento e orientação espacial no cenário de observação. Esta análise abrange, também, a multiplicidade de soluções possíveis para a composição de sistema de medição óptica no que se refere ao tipo e às características intrínsecas dos seus elementos constituintes (objetiva, filtro óptico, sensor de imagem e alvo). Neste âmbito, são indicadas as vantagens e limitações da abordagem selecionada e mencionadas as especificidades próprias associadas a um cenário de observação contínua ou permanente, que importa ter em conta na concretização do sistema de medição.

Expõem-se, ainda, aspetos globais de dimensionamento do sistema de medição, nomeadamente, a posição espacial do referencial de medição, a resolução angular instrumental e a requerida, bem como a dimensão global dos alvos, tendo por objetivo o estabelecimento de uma base de suporte ao projeto de soluções de visão computacional para a medição dimensional com distâncias de observação compreendidas entre 100 m e 1000 m. Mencionam-se, igualmente, os principais elementos associados à aquisição e ao processamento digital de imagens dos alvos

com impacto no desempenho do sistema de medição e na qualidade da medição pretendida.

Neste Capítulo 3 são apresentados os fundamentos teóricos associados à modelação geométrica da câmara. Tratando-se de uma medição óptica realizada a longa distância, considera-se importante promover o estudo da influência do meio de propagação – o ar atmosférico – entre a fonte emissora e o sensor de imagem (descrito em sub-capítulo próprio) no que se refere à modelação dos fenómenos atmosféricos de atenuação (por absorção e dispersão), refração e turbulência.

Segue-se a descrição do conjunto de métodos de ensaio aplicáveis à caracterização metrológica da câmara e do referencial de medição composto por alvos ativos. Este aspeto é particularmente relevante pelo facto de o sistema de medição proposto ser composto por elementos do tipo *off-the-shelf*, sendo essencial para a definição de uma base comparativa entre as soluções tecnológicas disponíveis para cada tipo de componente. De facto, a informação de natureza metrológica associada a um dado componente é, por vezes, inexistente ou incompleta, dependendo do seu fabricante ou fornecedor, tornando difícil uma comparação rigorosa entre soluções possíveis. Em acréscimo, a indicação sobre a rastreabilidade de características metrológicas relevantes do componente pode ser omissa ou pouco clara, suscitando dúvidas sobre a sua qualidade metrológica.

Justifica-se, portanto, a apresentação do suporte experimental necessário ao julgamento correto da sua adequabilidade metrológica, avaliando a proximidade entre os modelos teóricos apresentados neste Capítulo e o seu comportamento real. No caso específico do método de medição proposto, este tipo de atividade metrológica permite quantificar grandezas essenciais para a concretização da abordagem de medição dimensional selecionada, nomeadamente, no que respeita aos parâmetros intrínsecos da câmara e às coordenadas mundo dos alvos que formam o referencial de medição. A avaliação periódica das características metrológicas mais relevantes permite analisar a sua evolução temporal e identificar fenómenos de degradação decorrentes da agressividade ambiental e operacional associadas ao meio e à infraestrutura observada.

Por último, é apresentado o método de calibração dimensional proposto para o sistema de medição desenvolvido, sendo descrita a respetiva cadeia de rastreabilidade

que assegura a sua ligação ao SI de Unidades no domínio dimensional, permitindo quantificar o seu nível de exatidão instrumental e estabelecer uma comparação fundamentada com outras soluções de medição emergentes no contexto da observação dimensional terrestre de infraestruturas dinâmicas (por exemplo, sistemas GNSS ou sistemas de radar interferométrico) ou no próprio contexto de soluções de medição óptica diversificadas (configuração singular, múltipla, de câmara fixa ou móvel).

3.2 Abordagem de medição

3.2.1 Configuração singular *versus* configuração múltipla

Atualmente, a medição dimensional por via óptica apresenta um desenvolvimento acentuado e consolidado em áreas distintas como: (i) da Visão Computacional, em aplicações em tempo real no domínio da robótica, computação gráfica e deteção de objetos, onde as distâncias de observação são, em regra, inferiores a dez metros; (ii) da Fotogrametria, em observações temporalmente discretas onde as distâncias de observação são inferiores a 100 metros ou superiores a 1000 m, respetivamente, no caso de observações terrestres e aéreas.

O conjunto de aplicações intermédias entre a Visão Computacional e a Fotogrametria – observação dinâmica envolvendo distâncias compreendidas entre 100 metros e 1000 metros – constitui justamente uma região de interesse para a observação terrestre de infraestruturas em Engenharia Civil.

No conjunto de soluções ópticas desenvolvidas é possível distinguir dois tipos de configurações geométricas pelo número de câmaras utilizadas: (i) a configuração singular ou monoscópica, onde se recorre a uma única câmara para a observação de alvos colocados numa região de interesse; (ii) a configuração múltipla, onde duas ou mais câmaras procuram obter imagens do mesmo conjunto de alvos segundo diferentes posicionamentos espaciais e orientações, de que a configuração estereoscópica com duas câmaras é um exemplo particular.

Caso a configuração singular assegure um nível de exatidão dimensional adequado à observação pretendida, esta é preferível relativamente à configuração múltipla visto que a sua concretização experimental apresenta:

- (i) maior simplicidade, não sendo necessário garantir uma condição de sincronismo no processo de aquisição múltipla de imagens provenientes de

diferentes câmaras; no caso particular da observação dimensional terrestre de infraestruturas dinâmicas este condicionalismo é agravado pelas elevadas distâncias envolvidas, constituindo um problema complexo e de resolução dispendiosa¹; em acréscimo, a aplicação de uma configuração óptica múltipla implica, em regra, um maior número de alvos sendo necessário garantir uma condição mínima de visibilidade simultânea dos alvos segundo as diferentes posições espaciais e orientações das câmaras que compõem o sistema de observação;

- (ii) estabilidade numérica, visto que o número de variáveis associadas à medição dimensional é bastante mais reduzido, tornando o processo de cálculo mais simples e robusto, não requerendo meios computacionais com elevada capacidade de cálculo numérico;
- (iii) menor custo económico na aquisição, instalação, operação e manutenção do sistema de medição e respetivos componentes.

3.2.2 Configuração singular de câmara fixa

No conjunto de abordagens ópticas de configuração singular é possível distinguir entre as abordagens do tipo câmara fixa, sendo esta posicionada numa região estática do cenário de observação, e do tipo câmara móvel, cuja posição espacial e a orientação variam no tempo relativamente a um dado referencial, como se verifica no caso da Fotogrametria Aérea. A Figura 3.1 ilustra de, forma esquemática, a classificação das abordagens ópticas referidas anteriormente.

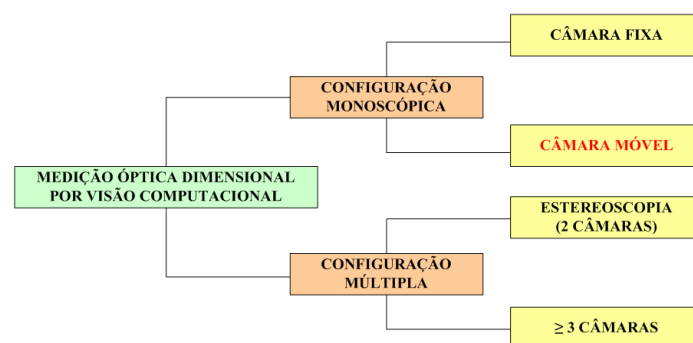


Figura 3.1: Classificação esquemática de abordagens ópticas para medição dimensional.

¹ No conjunto de soluções de comunicação de sinal de sincronismo entre câmaras de visão computacional destacam-se: (i) a comunicação sem fios por via electromagnética ou óptica (FSO – *Free-Space Optics*); (ii) a comunicação via rede elétrica ou fibra óptica entre câmaras.

A aplicação de uma abordagem óptica de configuração singular do tipo câmara fixa – recorrente ao nível da Fotogrametria Terrestre – apresenta um elevado grau de dificuldade num cenário de observação dimensional terrestre de infraestruturas dinâmicas, dada a elevada magnitude que caracteriza a distância entre câmara e alvos, em regra, compreendida entre 100 m e 1000 m. Sendo necessário garantir uma sensibilidade satisfatória à medição dos deslocamentos da infraestrutura, os quais poderão apresentar valores bastante reduzidos (por exemplo, na ordem de magnitude milimétrica ou sub-milimétrica), os sistemas ópticos utilizados tendem a apresentar uma elevada distância focal e, consequentemente, um campo de visão mais reduzido, o que dificulta a visualização simultânea de alvos de referência (localizados em regiões com comportamento dinâmico pouco acentuado e com coordenadas previamente conhecidas num referencial de medição) e de alvos de monitorização (associados a regiões de interesse na infraestrutura dinâmica observada).

É possível referir, como exemplos, os casos da observação dimensional de ponte ou viaduto com vão principal de elevada dimensão ou de uma grande barragem de betão, conforme se menciona no Quadro 3.1. Note-se que, em grandes obras caracterizadas por deslocamentos de elevada amplitude, como é o caso do deslocamento vertical em pontes suspensas de elevada dimensão², a visibilidade permanente de todos os alvos de referência e de monitorização torna-se uma condição ainda mais difícil de assegurar.

Quadro 3.1: Localização de regiões de interesse para concretização de abordagem óptica singular.

Tipo de infraestrutura	Regiões estáticas	Regiões dinâmicas
Ponte ou viaduto com vão de elevada dimensão	Fundações de torres e pilares Ancoragens Margens fluviais ou costeiras Encostas	½ e ¼ de vão
Grande barragem de betão	Margens fluviais Encostas	Coroamento Paramento

² Designação atribuída a pontes suspensas cujo vão principal apresenta um valor dimensional mínimo de 300 metros, podendo atingir um valor máximo próximo de 2000 metros (como é o caso atual da maior ponte suspensa do mundo – a Ponte Akashi Kaikyō, no Japão, inaugurada em 1998 – com um vão principal de 1991 metros).

3.2.3 Configuração singular de câmara móvel

3.2.3.1 *Descrição da abordagem proposta*

Tendo por objetivo ultrapassar esta limitação associada à configuração singular do tipo câmara fixa aplicada à observação dinâmica de grandes obras, é proposta uma abordagem óptica do tipo câmara móvel em que se promova uma ligação rígida de câmara à região dinâmica de interesse na infraestrutura sujeita a observação. Estando assegurada esta condição fundamental (ligação rígida) e efetuando uma modelação geométrica de câmara perspectiva, a posição espacial do respetivo centro de projeção é representativa da posição tridimensional da infraestrutura no local de instalação da câmara.

O posicionamento espacial e a orientação da referida câmara deverão garantir um campo de visão adequado à visualização permanente (tendo em conta a magnitude dos deslocamentos exetáveis na infraestrutura dinâmica) de um conjunto de alvos colocados numa região estática do cenário de observação, o qual deverá ser utilizado para a definição do referencial de medição de deslocamento tridimensional segundo direções de interesse relativamente à infraestrutura observada³.

A concretização desta abordagem implica o conhecimento prévio (antes da instalação inicial em obra) e regular (em caso de observação dimensional contínua) dos parâmetros intrínsecos⁴ da câmara utilizada (distância focal, coordenadas do ponto principal e coeficientes de distorção) e as coordenadas dos alvos no referencial de medição de deslocamentos adotado. Deste modo, é necessário garantir os meios experimentais adequados à caracterização metrológica dimensional e geométrica destes dois elementos do sistema óptico (câmara e alvos), conforme se discutirá em detalhe nos sub-capítulos 3.7 e 3.8.

³ Numa barragem de betão, o deslocamento tridimensional é distribuído segundo as direções vertical e horizontal relativamente ao seu paramento ou coroamento. No caso de uma ponte ou viaduto, as componentes do deslocamento tridimensional correspondem às direções longitudinal, transversal e vertical do vão observado.

⁴ Na parametrização de modelos geométricos de câmaras faz-se distinção entre parâmetros intrínsecos (distância focal, coordenadas de ponto principal, coeficientes de distorção da objetiva) e parâmetros extrínsecos (coordenadas espaciais e ângulos de orientação ou quaternião unitário associados à câmara).

O processamento digital de duas imagens temporalmente consecutivas permite que se obtenham as respectivas coordenadas dos alvos num referencial imagem que, em conjunto com o conhecimento das estimativas dos parâmetros intrínsecos da câmara e das coordenadas dos alvos num referencial mundo, asseguram a determinação das coordenadas tridimensionais do centro de projeção da câmara em dois instantes de tempo consecutivos permitindo, por operação de subtração, determinar os deslocamentos dinâmicos da infraestrutura. A determinação das coordenadas tridimensionais do centro de projeção da câmara é suportada nas equações de colinearidade estabelecidas entre pontos (representativos dos alvos) no mundo e na imagem, como se mostrará em detalhe no sub-capítulo 3.5. A Figura 3.2 ilustra o diagrama funcional associado ao processo de medição dimensional proposto, onde se podem identificar as grandezas de entrada, intermédias e de saída.

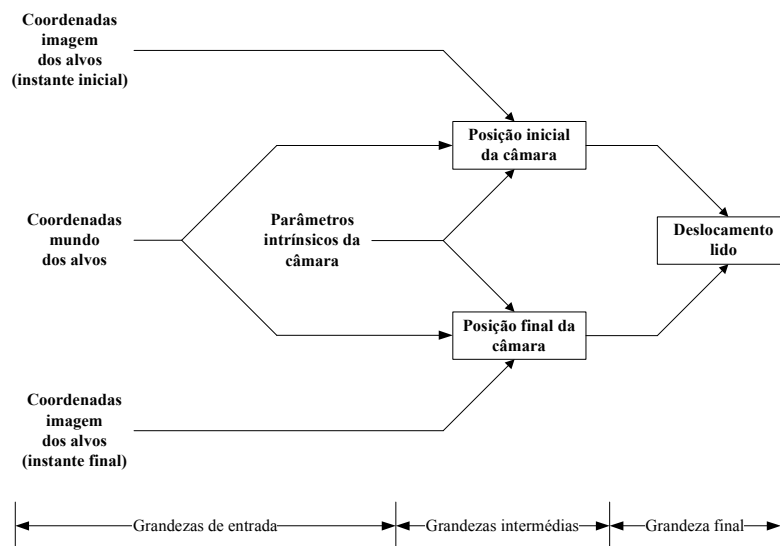


Figura 3.2: Diagrama funcional do processo de medição.

A análise das variáveis envolvidas no processo de medição descrito anteriormente revela a existência de seis a sete incógnitas associadas à posição (coordenadas tridimensionais) e à orientação da câmara (três ângulos de rotação de Euler ou, de forma equivalente, os quatro componentes do quaternião unitário), pelo que se torna necessário conhecer, no mínimo, as coordenadas de quatro alvos no referencial de medição (visto que cada alvo origina duas equações de colinearidade), formando um sistema de oito equações não-lineares donde se pretende obter uma solução estável para as incógnitas supracitadas.

3.2.3.2 *Vantagens e limitações*

Comparativamente com a abordagem singular de câmara fixa, a abordagem de câmara móvel apresenta como principais vantagens:

- (i) a possibilidade de utilização de objetivas com elevada distância focal e campo de visão estreito, visto ser necessário garantir apenas a visualização permanente de um conjunto de alvos de referência colocado numa única região com distâncias mútuas reduzidas, tendo em conta o deslocamento tridimensional expectável da câmara; consequentemente, este tipo de sistemas ópticos com elevada distância focal deverá permitir obter uma elevada sensibilidade na medição, a longa distância, do deslocamento tridimensional da infraestrutura;
- (ii) a formação de referencial de medição estável com base na distribuição espacial de quatro alvos de referência em coordenadas tridimensionais conhecidas e segundo direções de interesse no cenário de observação.

Contudo, são igualmente identificadas as seguintes limitações e vulnerabilidades:

- (i) a parametrização intrínseca de sistemas ópticos com elevada distância focal, corresponde a uma matéria de estudo emergente e, portanto, não consolidada;
- (ii) a estabilidade geométrica do sistema óptico a longo prazo, por efeito de solicitação dinâmica permanente em caso de cenário de observação dimensional contínua;
- (iii) a inoperacionalidade do sistema de medição em cenário com condições atmosféricas severamente adversas (neblina, nevoeiro, neve, granizo ou chuva intensa);
- (iv) a existência de fenómenos atmosféricos no meio de propagação, nomeadamente, refração e turbulência prejudiciais para o nível de exatidão da medição de deslocamentos pretendido;
- (v) a presença de perturbações dinâmicas ambientais decorrentes, por exemplo, do vento e de atividade sísmica e também de natureza operacional (tráfego, escoamentos hidráulicos, etc.) sobre a câmara e alvos.

Com efeito, para garantir o sucesso da concretização experimental da abordagem óptica proposta, é necessário desenvolver o conhecimento e os meios necessários para ultrapassar, controlar ou minimizar as limitações e vulnerabilidades apontadas, constituindo um dos objetivos a atingir com o presente estudo.

No caso da parametrização intrínseca de sistemas ópticos com elevada distância focal, é possível constatar o recente desenvolvimento de métodos adequados a esta tarefa metrológica, conforme será discutido no sub-capítulo 3.7, em virtude das limitações numéricas observadas no estudo dos métodos convencionais desenvolvidos para o contexto de sistemas ópticos com reduzida distância focal.

Estes métodos emergentes podem assegurar a determinação regular dos parâmetros intrínsecos de um sistema óptico utilizado na observação contínua de uma infraestrutura dinâmica, permitindo quantificar a alteração das estimativas dos parâmetros a longo prazo. A sua contabilização como uma componente de incerteza (deriva) no balanço de incerteza instrumental deve, neste contexto, permitir estabelecer um valor alvo aceitável face à utilização do sistema óptico para efeito de observação dimensional.

Relativamente à influência atmosférica no processo de medição óptica dimensional a longa distância importa avaliar, numa primeira fase, o registo histórico de condições ambientais adversas associadas ao cenário de observação, tendo em vista a identificação de janelas temporais de curto prazo (para observação pontual) ou de médio e longo prazo (para observação contínua), que sejam aceitáveis para a realização de medições. Numa segunda fase, considera-se importante avaliar a influência das condições térmicas do cenário de observação junto às regiões de instalação da câmara e dos alvos, uma vez que o seu efeito é determinante para a magnitude dos fenómenos de refração e turbulência atmosférica, como se poderá concluir do estudo apresentado no sub-capítulo 3.6.

No que se refere às perturbações de natureza dinâmica, é relevante garantir que os componentes ópticos e fotónicos utilizados possuam uma adequada resistência a efeitos dinâmicos ambientais mediante avaliação prévia (em regra, efetuada pelo fabricante do equipamento) de acordo com o atual enquadramento definido pela norma ISO 9022. Esta norma de referência estabelece um vasto conjunto de métodos

de ensaios de natureza ambiental⁵, onde se inclui o ensaio dinâmico de componentes ópticos [ISO 9022-22 (2012)] que prevê a aplicação, em cada eixo principal do componente, de aceleração com magnitude aproximada de $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, numa frequência compreendida entre 20 Hz e 500 Hz durante 30 minutos. Quanto à transmissão de elevadas frequências de vibração, propõe-se o uso de materiais de isolamento na ligação e interface infraestrutura / sistema óptico, tendo em vista a sua mitigação.

3.2.4 Componentes do sistema de medição

3.2.4.1 Nota introdutória

O sistema de medição associado à abordagem óptica selecionada apresenta, como elementos constituintes, a câmara e os alvos que formam o referencial de medição. Nas secções seguintes promove-se uma descrição sumária dos principais componentes associados a estes dois elementos, tendo por objetivo apresentar o conjunto de soluções técnicas consideradas adequadas para a concretização do sistema de medição pretendido. No caso da câmara, esta discussão engloba a seleção do tipo de objetiva, filtro óptico e sensor de imagem, suportada no recurso a componentes ópticos do tipo *off-the-shelf* enquanto que, no caso dos alvos, a discussão prende-se com a natureza ativa ou passiva deste elemento e com o desenvolvimento de solução dedicada (*custom-made*) justificada pela elevada especificidade do problema estudado.

3.2.4.2 Objetiva e filtro óptico

Uma objetiva constitui um sistema de lentes que contribui para a formação de imagem num sistema óptico, sendo habitualmente classificada de acordo com o respetivo valor fixo ou variável (do tipo *zoom*) de distância focal e consoante a sua

⁵ A norma ISO 9022 está dividida em 23 partes das quais se destacam: 1 – Definições e âmbito de ensaio; 2 – Frio, calor e humidade; 3 – Tensão mecânica; 4 – Nevoeiro salino; 5 – Combinação de frio e pressão atmosférica reduzida; 6 – Poeiras; 7 – Resistência a gotas ou chuva; 8 – Pressão elevada, pressão reduzida, imersão; 9 – Radiação solar; 11 – Crescimento de bolor; 12 – Contaminação; 14 – Orvalho, geada e gelo; 17 – Combinação entre contaminação e radiação solar; 18 – Combinação entre calor húmido e pressão interna reduzida; 20 – Atmosfera húmida contendo dióxido de enxofre e sulfureto de hidrogénio; 21 – Combinação entre pressão reduzida e temperatura ambiente ou calor seco; 22 – Combinação entre frio, calor seco ou alteração de temperatura com choque ou vibração aleatória; 23 – Pressão reduzida combinada com frio, temperatura ambiente e calor seco ou húmido.

magnitude. Neste último caso, são consideradas três categorias de objetivas⁶ – teleobjetiva, normal e grande angular – correspondendo, respetivamente, a distância focal elevada, moderada e reduzida, conforme se ilustra no Quadro 3.2.

Quadro 3.2: Categorias de objetivas e respetivos valores típicos de distância focal.

Categoria	Distância focal fixa	Distância focal variável (<i>zoom</i>)
Teleobjetiva	60 mm 300 mm 500 mm 800 mm	(50 – 150) mm, (50 – 500) mm, (70 – 200) mm, (70 – 300) mm, (120 – 300) mm, (120 – 400) mm, (150 – 500) mm, (200 – 500) mm, (300 – 800) mm
Normal	30 mm 35 mm 50 mm 85 mm	(17 – 70) mm, (17 – 50) mm, (18 – 35) mm, (24 – 70) mm, (24 – 105) mm
Grande angular	19 mm 20 mm 24 mm 28 mm	(8 – 16) mm (10 – 20) mm (12 – 24) mm

No caso da observação dimensional terrestre de infraestruturas dinâmicas têm particular interesse a categoria de teleobjetivas, visto apresentarem valores de distância focal bastante elevados, permitindo visualizar regiões estruturais a longa distância e garantir, simultaneamente, uma sensibilidade de medição dimensional adequada. Tendo em conta a abordagem óptica proposta, o recurso a uma teleobjetiva com distância focal fixa é recomendado face à alternativa do tipo variável (*zoom*) onde, necessariamente, a incerteza de medição desta grandeza de entrada será maior devido ao seu processo de ajuste *in situ* junto a uma posição de seleção que é caracterizada previamente, na sua geometria, em laboratório.

Em regra, o custo económico das teleobjetivas é bastante elevado relativamente a outro tipo de objetivas, o que poderá condicionar a sua utilização na câmara. Uma alternativa economicamente viável para ultrapassar este condicionalismo de natureza económica consiste no recurso a um duplicador óptico associado a uma teleobjetiva com menor distância focal.

⁶ Para além destas três classes, existem duas classes complementares de objetivas cujo âmbito de aplicação não se adequa ao problema em estudo: (i) as objetivas olho-de-peixe ou ultra grande angular, associadas a valores de distância focal entre 1 mm e 10 mm, que dão origem a imagens panorâmicas ou hemisféricas significativamente afetadas por distorção; (ii) a objetiva macro, que permite reduzidas distâncias de observação relativamente ao objeto visualizado (também com reduzida dimensão), apresentando valores de distância focal compreendidos, em regra, entre 30 mm e 200 mm.

A maioria das objetivas permite incluir um filtro óptico, o que se revela importante no contexto do estudo desenvolvido, nomeadamente, em caso de recurso a alvos ativos, isto é, com capacidade própria de emissão de radiação. Nesta situação, a utilização de um filtro óptico permitirá eliminar bandas do espectro electromagnético indesejáveis na observação pretendida. Por exemplo, se o alvo ativo constituir uma fonte luminosa de radiação infravermelha, o recurso a um filtro óptico do tipo passa-alto permitirá eliminar a radiação visível proveniente do meio envolvente ao alvo, melhorando a qualidade da imagem obtida.

3.2.4.3 Sensor de imagem

Os sensores de imagem digital apresentam uma área sensível composta por semicondutores óxidometálicos distribuídos de forma regular e discreta nessa área. Estes elementos individuais – designados por píxeis – asseguram a conversão da quantidade de luz (fotões) que neles incidem, em carga elétrica (eletrões) que, por sua vez, dá origem a uma tensão elétrica, numa primeira fase em sinal analógico e, posteriormente, em sinal digital (número digital ou DN – *digital number*)

Em medições caracterizadas por requisitos de elevada resolução espacial, contraste, sensibilidade em ambientes de reduzida luminosidade e de relação sinal-ruído, recorre-se a sensores de imagem com apenas uma banda pancromática, ou seja, sensível apenas à radiação eletromagnética compreendida numa gama limitada de comprimento de onda, em regra, na região do visível. A imagem produzida por este tipo de sensor apresenta tons cinzentos (compreendidos entre o branco e o escuro), refletindo o brilho aparente dos objetos mas não contendo informação espectral ou colorimétrica desses objetos.

No atual conjunto de sensores de imagem digital, é efetuada a distinção entre duas categorias principais: sensores CCD e sensores CMOS – *Complementary Metal- Oxide-Semiconductor*. A principal diferença constitutiva entre sensores CCD e CMOS reside na localização dos circuitos eletrónicos responsáveis pelos processos de amplificação e conversão analógica digital. No caso do sensor CCD, os referidos circuitos estão localizados numa região exterior à grelha de píxeis enquanto que no sensor CMOS, estes estão incorporados na região envolvente a cada píxel. Este facto justifica as diferenças relativas entre ambos, expostas no Quadro 3.3 [Edmund (2014)].

Quadro 3.3: Comparação entre sensores CCD e CMOS.

Sensor	Factor de enchimento ⁷	Sensibilidade	Nível de ruído	Gama dinâmica	Uniformidade
CCD	++	+	-	++	++
CMOS	+	+ / ++	+ / ++	+	-
Sensor	Resolução	Velocidade	Consumo elétrico	Complexidade	Custo
CCD	- / + / ++	+ / ++	+ / ++	-	+
CMOS	- / + / ++	++	-	+	+

Legenda: (-) reduzido; (+) moderado; (++) elevado.

Nesta análise comparativa destaca-se o crescente aumento de sensibilidade nos sensores CMOS associado ao desenvolvimento tecnológico de componentes eletrónicos, ultrapassando os sensores CCD que, anteriormente, possuíam uma maior sensibilidade. Contudo, a qualidade de imagem obtida por sensor CCD continua a ser superior à do sensor CMOS em virtude do reduzido nível de ruído e da melhor uniformidade espacial. Em regra, o recurso aos sensores do tipo CMOS apenas é justificado em caso de necessidade de baixo consumo energético, velocidade de processamento elevada ou existência de restrições dimensionais uma vez que possui uma dimensão inferior à do sensor CCD.

3.2.4.4 Alvos

Um dos aspetos principais associado à definição dos alvos do sistema de medição refere-se à sua capacidade própria de emissão de radiação, traduzida na escolha entre alvos do tipo passivo ou ativo.

Numa perspetiva histórica, o alvo passivo – que apenas emite radiação por efeito de reflexão, estando a sua visibilidade dependente de iluminação natural ou artificial (permanente ou tipo *flash* no momento de aquisição de imagem) – possui uma utilização mais comum na observação de infraestruturas por meios ópticos, sobretudo, nos contextos da Geodesia e da Fotogrametria Terrestre. Nestas áreas, os alvos passivos apresentam formas geométricas simples, resultantes da combinação de quadrados ou círculos concêntricos (brancos e pretos, por exemplo) ou formas mais complexas, como é o caso dos alvos codificados para leitura automática de dados

⁷ Corresponde à fração da área do píxel associada à fotodeteção. Um fator de enchimento elevado (por exemplo, com o recurso a microlentes) traduz uma maior capacidade de captação de fótons incidentes e sensibilidade mais elevada.

relevantes (identificação, posição espacial e orientação). Alguns alvos passivos podem conter componentes ópticos do tipo retrorreflector prismático.

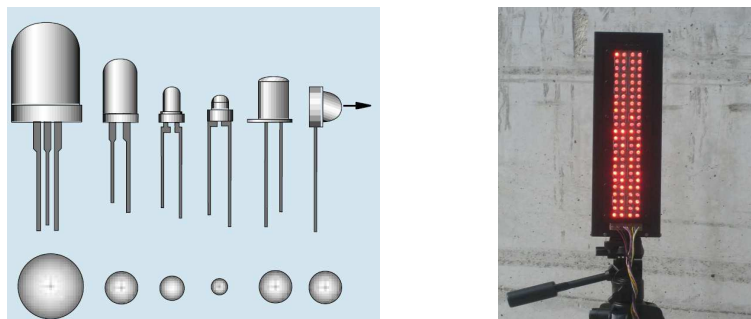
A aplicação de alvos do tipo ativo em sistemas ópticos para medição dimensional a longa distância é mencionada nos estudos realizados por [Marecos (1969)], [Wahbeh (2003)] e [Santos (2011)]. Este tipo de alvo apresenta várias vantagens relativamente ao alvo passivo, nomeadamente: (i) a seleção do comprimento de onda da radiação emitida tendo em conta a sua propagação na atmosfera; (ii) a capacidade para emissão de feixe luminoso com reduzida divergência geométrica, o que se traduz numa melhoria de visibilidade na observação realizada a longa distância; (iii) a capacidade de ajuste variável da intensidade energética de radiação emitida, contrariando a redução de visibilidade por efeito de atenuação atmosférica acentuada ou por efeito de alteração das condições de iluminação natural (observação diurna ou noturna) ou, ainda, por efeito de saturação do sensor de imagem.

O recurso a fontes emissoras do tipo LED constitui uma solução promissora para a definição de alvos ativos [Santos (2011)] notando-se que a sua crescente evolução tecnológica permitiu que adquirisse diversas vantagens relativamente a outros elementos ativos convencionais, designadamente, em relação às lâmpadas de incandescência. Neste âmbito importa referir que o LED, enquanto fonte luminosa, possui níveis mais elevados de intensidade energética, potência radiante, eficiência e durabilidade, apresentando dimensões e massa inferiores às lâmpadas de incandescência. Existem, também, diferenças térmicas significativas entre ambos, verificando-se que a utilização de lâmpadas de incandescência provoca um acréscimo da temperatura na região envolvente em que se encontra localizada alterando, consequentemente, o índice de refração do meio de propagação.

A utilização de LEDs em alvos ativos de sistemas de medição pode ser efetuada de forma individual ou singular, quando os requisitos dimensionais do alvo ativo pretendido se situam na ordem de magnitude do milímetro⁸. Note-se que, a nível comercial, é possível dispor de LEDs com encapsulamento semiesférico com diâmetros nominais compreendidos entre 1 mm e 10 mm (*vide* Figura 3.3) [Labsphere (2014)] sendo o valor nominal de 5 mm o mais comum. Para além do

⁸ Note-se que, no LED, as dimensões da área associada ao processo de geração de fotões são menores.

aspecto dimensional, o encapsulamento do LED possui uma importância acrescida na vertente óptica, determinando a distribuição espacial da radiação emitida, podendo atuar como um filtro cromático, caso seja necessário.



Figuras 3.3 e 3.4: LEDs com encapsulamento semiesférico de dimensão variável (à esq.) e alvo ativo composto por múltiplos LEDs (à dir.).

Quando os requisitos dimensionais do alvo apresentam uma dimensão superior à dimensão individual do LED, é possível promover a construção de alvos ativos compostos por múltiplos LEDs com distanciamento mútuo reduzido e dispostos espacialmente segundo uma forma geométrica pretendida, conforme se ilustra na Figura 3.4 para o caso de um alvo rectangular [Santos (2011)].

Este facto constitui uma vantagem adicional da utilização de LEDs como alvos ativos por ser possível alterar, de forma dinâmica, a dimensão global do alvo mediante ativação ou desativação de conjuntos de LEDs adjacentes, o que melhora a visibilidade do alvo face à mudança de condições atmosféricas ou de iluminação. Salienta-se que, embora os LEDs constituam componentes ópticos do tipo *off-the-shelf*, a construção de alvos ativos com múltiplos LEDs pode constituir uma solução dedicada e flexível do tipo *custom-made* respondendo a especificidades dimensionais dos problemas de observação.

3.2.5 Especificidades em cenário de observação permanente

3.2.5.1 Nota introdutória

As observações dimensionais realizadas com o sistema de medição proposto podem, numa perspetiva temporal, serem classificadas em dois tipos – pontual ou permanente – consoante a sua duração limitada (por exemplo, no contexto de realização de ensaios de carga na entrada ao serviço de uma grande obra) ou ilimitada com a medição contínua de deslocamento a longo prazo.

Este último cenário de observação permanente suscita um conjunto adicional de preocupações de natureza operacional:

- (i) a alteração sazonal diária e anual das condições ambientais com impacto na qualidade metrológica da medição dimensional pretendida;
- (ii) a exposição prolongada a condições ambientais e operacionais agressivas (temperatura e humidade elevadas, poeiras, iluminação solar, condensação, entre outras);
- (iii) a necessidade de recursos de visão computacional adequados ao processamento e análise de elevada quantidade de dados obtidos em tempo real e de forma contínua.

Justifica-se, deste modo, o aprofundamento deste tema, nomeadamente, o desenvolvimento de soluções de mitigação das preocupações existentes ao nível da observação dimensional permanente de infraestruturas dinâmicas.

3.2.5.2 Variação sazonal das condições ambientais

A variação sazonal das condições ambientais num cenário de observação permanente num horizonte temporal reduzido (variação diurna/noturna) ou prolongado (variação anual decorrente das estações do ano) é, sobretudo, manifestada pela variação temporal das grandezas temperatura e humidade do ar, iluminação natural e visibilidade atmosférica, que afetam o desempenho e a operacionalidade do sistema de medição. Justifica-se, por isso, que a concretização do sistema de observação dimensional permanente seja antecedida pelo estudo da evolução temporal típica das referidas grandezas a nível local, bem como, de eventuais diferenças relativas em termos espaciais.

Na caracterização da sazonalidade ambiental é vantajoso recorrer, numa primeira aproximação, a registos meteorológicos⁹ obtidos em regiões próximas da obra observada, as quais deverão ser similares em termos de altitude e meio envolvente (urbano, rural, marítimo ou fluvial, por exemplo). Em caso de inexistência

⁹ Obtidos por entidades meteorológicas, de navegação aérea ou marítima, organismos de gestão urbana ou rural e instituições de ensino e investigação científica. Estes registos podem incluir informação histórica relativa à temperatura e humidade relativa do ar, pressão atmosférica, temperatura de ponto de orvalho, velocidade e direção do vento, precipitação, profundidade de neve, visibilidade, cobertura de nuvens e poluição atmosférica, entre outros.

de informação representativa da sazonalidade ambiental na região envolvente à obra [Santos (2006)], será necessário proceder à realização de estudos de medição termohigrométrica, de iluminação natural e de visibilidade atmosférica, sobretudo, nas regiões de instalação dos dois principais componentes do sistema de medição (câmara e alvos).

No que respeita às medições termohigrométricas, as estimativas recolhidas são essenciais para a avaliação de gradientes verticais *in situ* determinando, mediante modelação matemática adequada, a necessidade de compensação dinâmica de desvios verticais sistemáticos nas coordenadas mundo dos alvos por efeito de refração atmosférica, bem como a quantificação da componente de incerteza associada ao efeito aleatório de turbulência atmosférica (feixe errante) nas coordenadas imagem dos alvos, posteriormente propagada para a incerteza de medição de deslocamento tridimensional. Caso se justifique, poderá ser necessário concretizar, em obra, um sistema permanente de medição termohigrométrica vertical.

No caso da iluminação natural, a informação sobre a radiação e geometria solar é relevante para o estabelecimento da configuração geométrica do sistema de medição, nomeadamente, na orientação da câmara. Pretende-se evitar, de forma contínua, orientações com exposição solar direta do sensor imagem e correspondente saturação. Este tipo de informação é importante para os alvos, em particular, para a avaliação da existência de sombra e da quantidade de radiação natural refletida pelas superfícies visíveis na imagem dos alvos, o que pode conduzir à necessidade de ajuste dinâmico de parâmetros associados: (i) à câmara, nomeadamente, no que respeita à abertura da objetiva e ao tempo de exposição; (ii) ao processamento digital de imagem dos alvos como, por exemplo, na definição de limite de *thresholding*; (iii) à intensidade de corrente que percorre os LEDs dos alvos e que determina a sua potência radiante.

A visibilidade atmosférica pode produzir a necessidade de realizar o ajuste dinâmico dos parâmetros referidos anteriormente. Em caso extremo, como na ocorrência de nevoeiro intenso, este fenómeno pode determinar a inoperacionalidade do sistema de medição pelo que o conhecimento prévio do número médio de dias, por ano, e do momento do dia em que este fenómeno atmosférico se verifica, são elementos indicadores da disponibilidade operacional do sistema de medição a curto e a longo prazo.

3.2.5.3 *Exposição ambiental e operacional prolongada*

Na concretização do sistema de medição em cenário de observação permanente é necessário garantir um elevado nível de proteção ambiental e operacional, mitigando a sua contínua degradação em virtude da agressividade do meio em que se insere.

Este aspeto tem particular importância no desenvolvimento das estruturas de alojamento da câmara e do referencial de medição com alvos, sendo necessário assegurar a sua adequabilidade na proteção contra:

- (i) condições térmicas extremas – neste âmbito pode ser necessário que as estruturas de alojamento disponham de sistema de controlo de temperatura (capacidade de aquecimento ou arrefecimento com ventilação forçada), de modo a garantir uma temperatura situada no intervalo térmico de operacionalidade;
- (ii) condensação nas janelas de emissão (no referencial) e de observação (na câmara) – sendo recomendável, nestes casos, a inclusão de um sistema de aquecimento das referidas janelas, evitando a formação de gotículas prejudiciais à aquisição de imagens dos alvos;
- (iii) humidade, precipitação e radiação solar – as estruturas de alojamento devem ser estanques à entrada de água; no caso específico da precipitação, a região da janela poderá apresentar um vidro repelente de gotículas e um escudo contra precipitação; recomenda-se a inclusão de proteção solar na região das janelas de emissão e observação das estruturas de alojamento;
- (iv) partículas sólidas (poeiras) – neste caso, as estruturas de alojamento devem, por um lado, impedir a entrada de poeiras para o seu interior e, por outro lado, evitar a sua acumulação na região exterior das janelas de emissão e observação, sugerindo-se a aplicação de vidro repelente;
- (v) corrosão – os materiais de construção das estruturas de alojamento da câmara e do referencial devem apresentar uma elevada resistência à corrosão, sobretudo, quando o sistema de medição se localiza numa região marítima caracterizada por ambiente salino;
- (vi) intrusão de pássaros – as estruturas de alojamento não devem constituir locais atrativos para o repouso ou a nidificação de pássaros;

- (vii) colisão de objetos – em grandes obras compostas por múltiplos elementos metálicos, é frequente registar-se a queda de objetos decorrentes do tráfego operacional.

A avaliação experimental das estruturas de alojamento construídas e classificação do respetivo grau de proteção podem ser realizadas de acordo com o atual enquadramento normativo definido pela norma IEC 60529:2013, que define o designado Código IP – *International Protection marking*. Na sua forma mais simples, esta classificação normativa é efetuada em termos de proteção contra a entrada de objetos sólidos e de água, sendo declarada mediante uma expressão do tipo “IPxx”, onde as duas últimas letras estão associadas, respetivamente, aos níveis de proteção contra a entrada de objetos sólidos¹⁰ e de água¹¹ [IEC 60529 (2013)]. Salienta-se que, na maioria das aplicações que promovem uma exposição ambiental prolongada de câmaras, por exemplo, de videovigilância e de monitorização de tráfego, é usual exigir, pelo menos, uma classificação IP66, que se traduz numa proteção completa de contacto com partículas sólidas exteriores e resistência à incidência de jato de água forte¹².

3.2.5.4 Recursos de visão computacional

A medição contínua do deslocamento de uma infraestrutura mediante aplicação da abordagem óptica proposta, exige uma elevada capacidade computacional para o processamento das imagens (visando a extração das coordenadas imagem dos alvos) e para o respetivo cálculo do deslocamento em tempo real, em regra, associado a uma frequência de aquisição de imagem que se pretende a mais elevada possível, de modo a melhorar o nível de exatidão da análise dinâmica estrutural de modos e frequências principais de vibração. Num cenário de observação

¹⁰ Na proteção contra contacto e entrada de objetos são definidos sete níveis de proteção, desde o grau 0 (sem proteção) até ao grau 6 (proteção total).

¹¹ Na proteção contra a entrada de água são definidos 11 níveis de proteção, desde o grau 0 (inexistência de proteção) até ao grau 9k (proteção contra jatos de elevada pressão a curta distância).

¹² O ensaio experimental normativo prevê que a projeção de jato de água (recorrendo a difusor com diâmetro nominal de 12,5 mm) contra a estrutura de alojamento não provoque qualquer dano significativo, independentemente da direção de projeção. Este ensaio apresenta uma duração de, pelo menos, três minutos sendo necessário estabelecer caudal volumétrico de projeção de água igual a 100 L·min⁻¹ e uma pressão de 100 kPa a uma distância de 3 m.

pontual (por exemplo, num ensaio de entrada ao serviço da obra), estas questões não apresentam um carácter prioritário visto que, em regra, as atividades de processamento de imagem e cálculo são efetuadas em modo diferido e não em tempo real. Neste âmbito, é necessário ter em conta os recursos computacionais associados ao sistema de medição pretendido, sendo possível intervir de duas formas distintas: a nível da seleção da câmara utilizada e a nível dos algoritmos de processamento e computação.

No que se refere à seleção da câmara, importa ter em conta a respetiva taxa de transferência de informação digital. Atualmente, existem diversas soluções tecnológicas que apresentam taxas de transferência distintas, compreendidas entre $400 \text{ Mb} \cdot \text{s}^{-1}$ (interface digital FireWire 1394.a) e $5 \text{ Gb} \cdot \text{s}^{-1}$ (interface digital USB 3.0) [Edmund (2014)]. Deste modo, recomenda-se o recurso a câmara com interface digital USB 3.0 na concretização da abordagem de medição em caso de cenário de observação permanente.

No que respeita aos algoritmos aplicáveis, mencionam-se as seguintes alternativas para melhoria da capacidade de processamento e cálculo computacional:

- (i) a adoção de processamento computacional em paralelo, cada vez mais acessível em termos de recursos computacionais necessários à sua concretização;
- (ii) a utilização parcial da área sensível do sensor de imagem (correspondente a uma menor quantidade de informação digital recolhida), definindo uma sub-imagem dos alvos nos casos em que a dimensão do referencial na imagem é reduzida comparativamente com a dimensão total da imagem e o deslocamento tridimensional da obra não apresente uma magnitude elevada;
- (iii) o desenvolvimento e a concretização de estratégia de seguimento dos alvos para previsão da trajetória¹³ do seu deslocamento virtual na imagem e

¹³ Um exemplo de algoritmo de seguimento de alvos é apresentado em [Santos (2011)], baseado em filtro recursivo de Kalman e dedicado ao caso específico de deslocamento dinâmico de baixa frequência associado a ponte suspensa com vão de elevada dimensão. Neste caso, a sua concretização experimental implica o recurso a duas câmaras e a, pelo menos, três pontos de referência não-colineares.

correspondente seleção prévia da área parcial de interesse no sensor, com a consequente diminuição da quantidade de informação digital recolhida.

3.3 Dimensionamento do sistema de medição

3.3.1 Nota introdutória

O processo de dimensionamento do sistema de medição associado à concretização da abordagem óptica descrita na secção 3.2.3 apresenta um conjunto de etapas sequenciais que se descrevem em seguida.

3.3.2 Posição espacial do referencial de medição

A análise do cenário de observação da infraestrutura deve ter em vista o **posicionamento do referencial numa região estática**, comparativamente com a região de medição de deslocamento dinâmico, e a respetiva orientação segundo as direções de deslocamento de interesse¹⁴.

Neste âmbito importa minimizar a distância de observação em relação à região dinâmica de interesse de modo a aumentar a sensibilidade de medição de deslocamento (para uma dada distância focal) e a diminuir a vulnerabilidade do sistema de medição a fenómenos adversos (atenuação atmosférica por nevoeiro ou chuva intensa, por exemplo) que originam uma significativa redução de visibilidade dos alvos. Importa, também, evitar a sobreposição de linhas de visão entre os alvos e a câmara, de forma a garantir a visualização permanente e individual dos quatro alvos que compõem o referencial de medição.

3.3.3 Resolução angular instrumental e requerida

Na abordagem proposta é necessário assegurar que o sistema de medição possui uma **resolução angular instrumental** inferior, $\Delta\theta_{\text{inst}}$, à **resolução angular requerida**, $\Delta\theta_{\text{req}}$, para a observação de deslocamentos em direções de interesse, ou seja,

$$|\Delta\theta_{\text{inst}}| < |\Delta\theta_{\text{req}}|. \quad (3.1)$$

¹⁴ Por exemplo, ao nível de uma ponte ou viaduto, os deslocamentos vertical, transversal e longitudinal de um vão e, ao nível de uma barragem, os deslocamentos vertical e horizontal, neste último caso nos sentidos montante/jusante e margem direita/esquerda.

A resolução angular instrumental associada a uma câmara (*vide* Figura 3.5) é determinada pela dimensão linear do píxel (que se assume quadrado) do sensor de imagem, p , pela distância focal da objetiva, f , e pelo nível de exatidão¹⁵ do processamento digital da imagem do alvo, η , no que respeita à determinação do seu centro geométrico, ou seja,

$$\Delta\theta_{\text{inst}} = 2 \cdot \text{tg}^{-1}\left(\frac{p}{2f}\right) \cdot \eta. \quad (3.2)$$

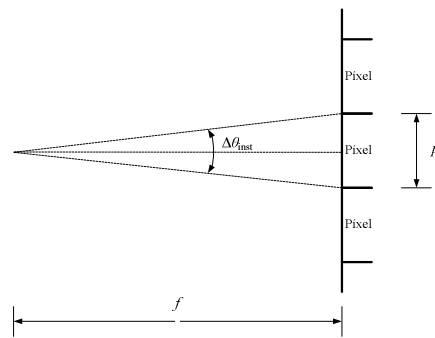


Figura 3.5: Representação esquemática da resolução angular instrumental de uma câmara.

No contexto da observação dimensional terrestre de infraestruturas revela-se importante avaliar a resolução angular associada às câmaras de utilização recorrente, constituídas por elementos comercialmente acessíveis, nomeadamente, objetivas com elevada distância focal (compreendida entre 300 mm e 800 mm) e sensores de imagem com dimensão linear de píxel quadrado variável entre 2,5 μm e 10 μm .

As Figuras 3.6 a 3.9 constituem representações gráficas da resolução angular instrumental em função da distância focal e da dimensão do píxel do sensor, para os respetivos níveis de exatidão do processamento digital de imagem de $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ e 1 píxel. Por sua vez, a Figura 3.10 resume os intervalos de resolução angular instrumental obtidos para diferentes níveis de exatidão no processamento digital de imagem dos alvos.

¹⁵ Usualmente expresso em frações do píxel ($p/2$, $p/4$ e $p/10$, por exemplo).

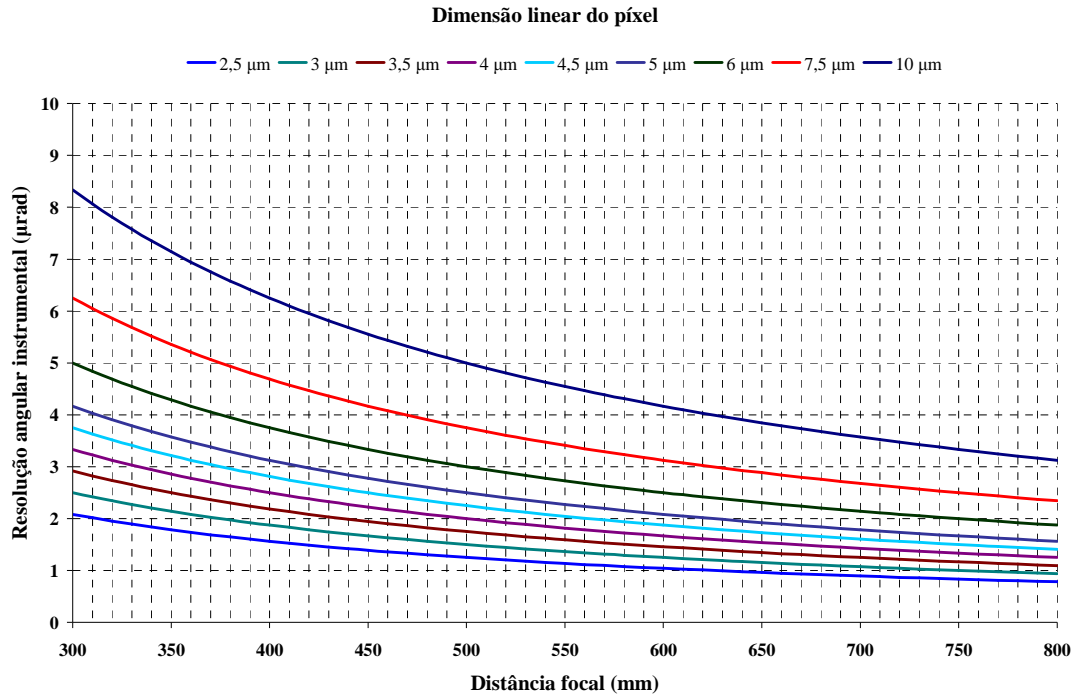


Figura 3.6: Resolução angular instrumental para $\eta = 1/4$ píxel.

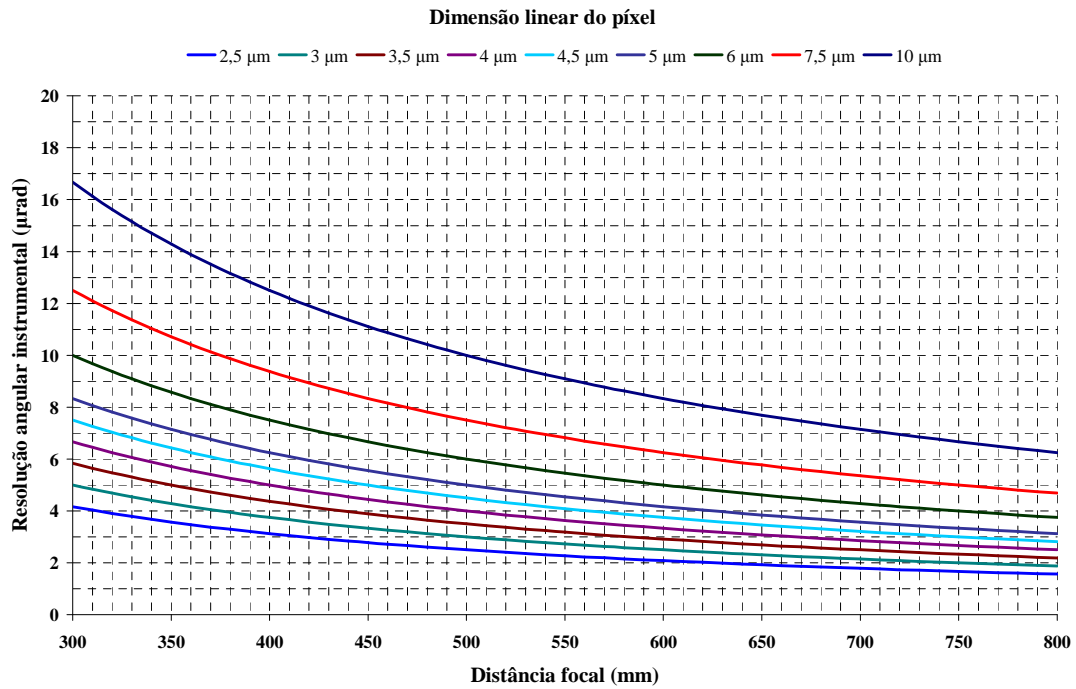


Figura 3.7: Resolução angular instrumental para $\eta = 1/2$ píxel.

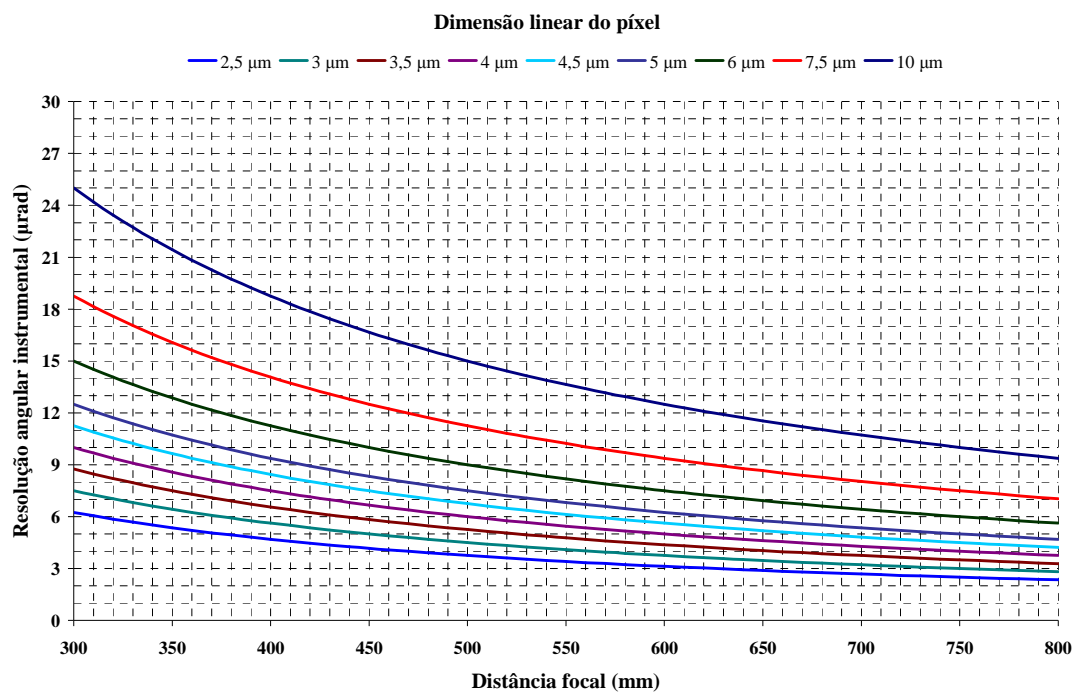


Figura 3.8: Resolução angular instrumental para $\eta = 3/4$ píxel.

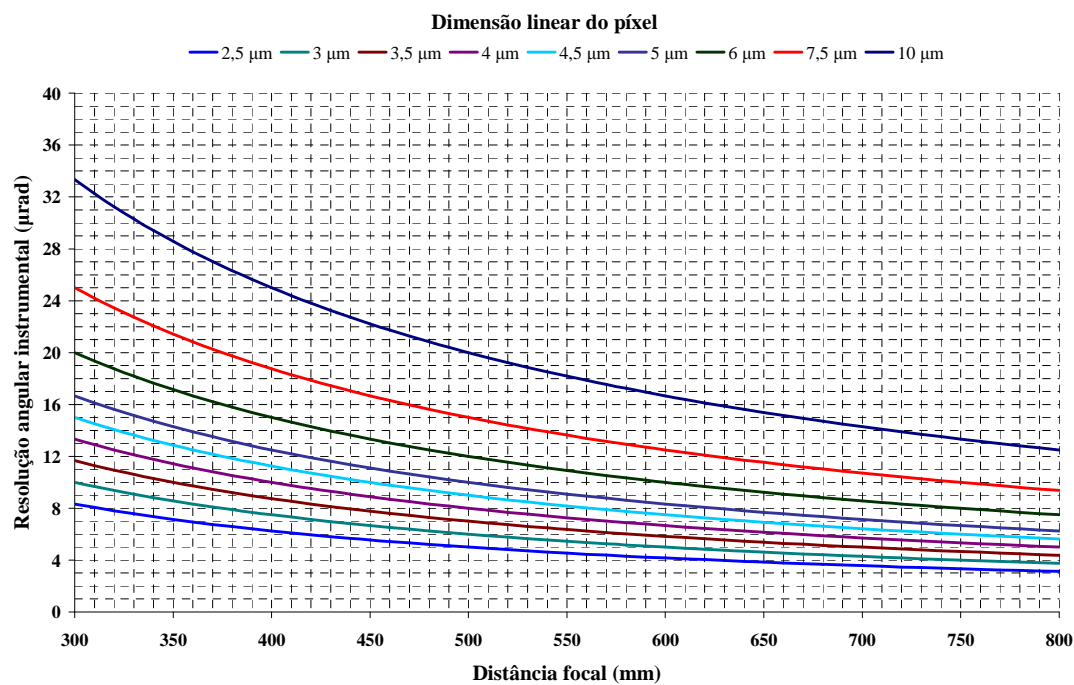


Figura 3.9: Resolução angular instrumental para $\eta = 1$ píxel.

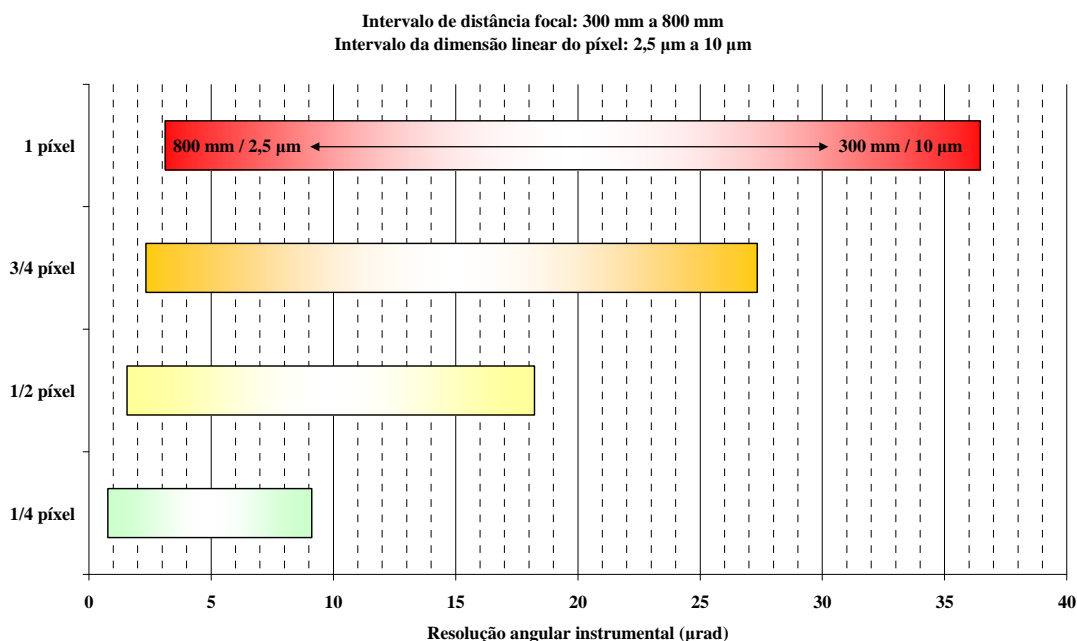


Figura 3.10: Intervalos de resolução angular instrumental para câmaras comerciais.

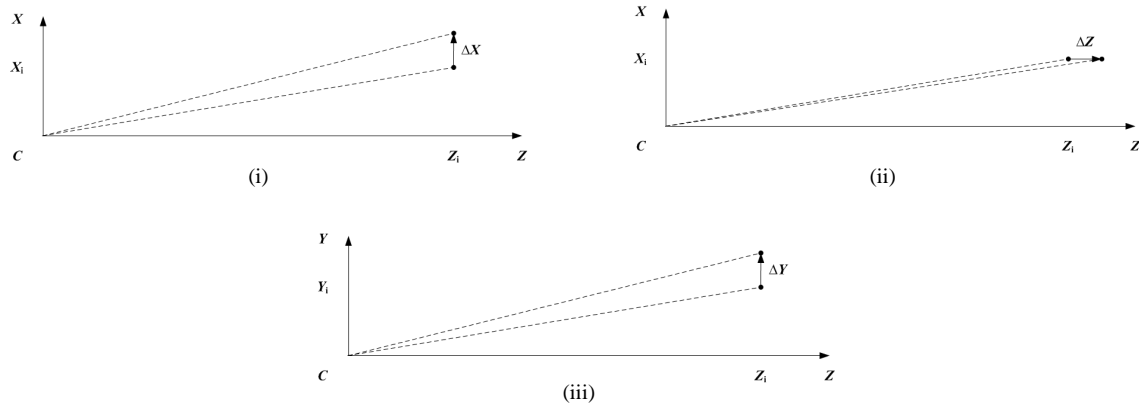
A melhor resolução angular instrumental é obtida para um nível de exatidão de $\frac{1}{4}$ de píxel no processamento digital, variando entre 0,8 μrad , no caso extremo de distância focal de 800 mm e dimensão de píxel igual a 2,5 μm , e 8,3 μrad , no caso oposto de distância focal de 300 mm e dimensão de píxel igual a 10 μm .

Conhecidos os intervalos de resolução angular instrumental associados a câmaras comerciais, importa avaliar a resolução angular requerida em contexto de observação dimensional terrestre de infraestruturas, tendo em conta a configuração geométrica expectável da abordagem óptica proposta em cenário de observação e a sensibilidade de medição de deslocamento tridimensional estabelecida para a análise estrutural dinâmica da obra observada.

Para a configuração geométrica foi considerada a seguinte distribuição espacial da câmara relativamente ao referencial mundo (X,Y,Z): (i) na direção Z (direção longitudinal) – posicionamento espacial entre 100 m e 1000 m; (ii) nas direções X e Y (direções transversal e vertical, respetivamente) – posições espaciais de 5 m, 50 m e 150 m. Em termos de sensibilidade de medição de deslocamento, foram estudadas as amplitudes de 1 mm e 10 mm em direções de interesse no referencial mundo (ΔX , ΔY , ΔZ).

As Figuras 3.11 a 3.13 constituem representações esquemáticas da análise efetuada, salientando-se os seguintes pontos:

- (i) é indiferente considerar o deslocamento real da câmara relativamente ao referencial mundo estático ou o deslocamento virtual da origem do referencial mundo assumindo um comportamento estático da câmara;
- (ii) é assumida uma condição ideal de alinhamento dos eixos tridimensionais entre os referenciais mundo e câmara; numa situação real, esta condição não é verificada (em regra, por motivo da divergência dos feixes luminosos emitidos pelos alvos ativos, procura-se alinhar o eixo óptico da câmara com a origem do referencial mundo) pelo que, uma eventual análise de sensibilidade de medição de deslocamento deverá ser realizada após decomposição vetorial pelas respetivas componentes tridimensionais associadas ao referencial câmara.



Figuras 3.11 a 3.13: Resolução angular requerida para medição de deslocamento:

(i) na direção X; (ii) na direção Z; (iii) na direção Y.

Com base nas Figuras anteriores, é possível formular as respetivas relações trigonométricas que suportam a quantificação da resolução instrumental angular requerida nos cenários de observação em estudo:

$$\Delta\theta_{\text{req}_X} = \text{tg}^{-1}\left(\frac{X_i + \Delta X}{Z_i}\right) - \text{tg}^{-1}\left(\frac{X_i}{Z_i}\right); \quad (3.3)$$

$$\Delta\theta_{\text{req}_Z} = \text{tg}^{-1}\left(\frac{X_i}{Z_i}\right) - \text{tg}^{-1}\left(\frac{X_i}{Z_i + \Delta Z}\right); \quad (3.4)$$

$$\Delta\theta_{\text{req}_Y} = \text{tg}^{-1}\left(\frac{Y_i + \Delta Y}{Z_i}\right) - \text{tg}^{-1}\left(\frac{Y_i}{Z_i}\right). \quad (3.5)$$

As Figuras 3.14 e 3.15 representam a evolução da resolução angular requerida em função do intervalo de posicionamento longitudinal e das posições transversais ou verticais estudadas para um dado deslocamento transversal (ΔX) ou vertical (ΔY) com amplitude de 1 mm e 10 mm, respetivamente.

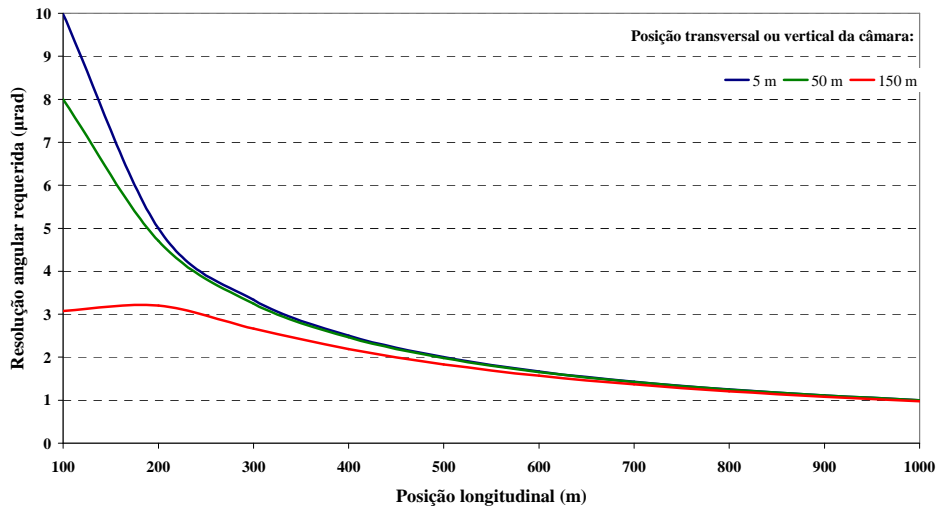


Figura 3.14: Resolução angular requerida para medição de deslocamento $\Delta X = 1 \text{ mm}$ ou $\Delta Y = 1 \text{ mm}$.

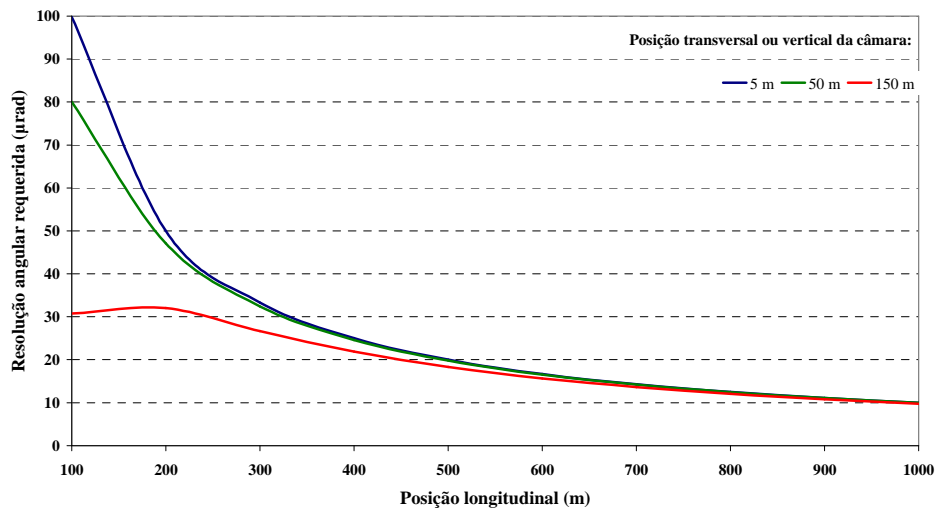


Figura 3.15: Resolução angular requerida para medição de deslocamento de $\Delta X = 10 \text{ mm}$ ou $\Delta Y = 10 \text{ mm}$.

A análise da Figura 3.14 revela uma convergência decrescente dos valores de resolução angular requerida a partir de uma posição longitudinal próxima de 200 metros, atingindo um valor de 1 μ rad, aproximadamente, na posição longitudinal extrema de 1000 metros. No intervalo de posição longitudinal compreendida entre 100 metros e 200 metros é possível observar que a posição de 150 m apresenta um valor de resolução instrumental significativamente inferior (em torno de 30 μ rad) aos valores obtidos para as restantes posições transversais ou verticais estudadas (5 m e 50 m) que, aliás, apresentam uma elevada proximidade. Como era esperado, a Figura 3.15 permite evidenciar o correspondente aumento da magnitude da resolução angular requerida quando o deslocamento vertical ou transversal possui uma amplitude de 10 mm.

Por sua vez, as Figuras 3.16 e 3.17 representam a evolução da resolução angular requerida em função do intervalo de posicionamento longitudinal e das posições transversais ou verticais estudadas para deslocamento longitudinal (ΔZ) com amplitude de 1 mm e 10 mm, respetivamente.

A Figura 3.16 permite observar valores de resolução angular requerida inferiores a 1 μ rad a partir de uma posição longitudinal de 350 m para todas as posições transversais e verticais estudadas. Em particular, nota-se que à medida em que a câmara se aproxima de uma situação de alinhamento longitudinal com o ponto de medição, a resolução angular requerida apresenta uma significativa redução da sua magnitude (*vide* curva azul associada à posição transversal ou vertical de 5 m). Comparativamente com a observação de deslocamentos verticais e transversais com a mesma amplitude, a observação do deslocamento longitudinal é mais exigente do ponto de vista instrumental, requerendo maior sensibilidade do sistema de medição.

Novamente, a Figura 3.17 permite mostrar que um aumento da amplitude do deslocamento longitudinal (de 1 mm para 10 mm) é refletido em valores de resolução angular requerida mais elevados. De facto, na situação extrema de uma posição longitudinal igual a 1000 m e uma posição transversal ou vertical de 150 m, a resolução angular requerida ainda apresenta um valor superior a 1 μ rad.

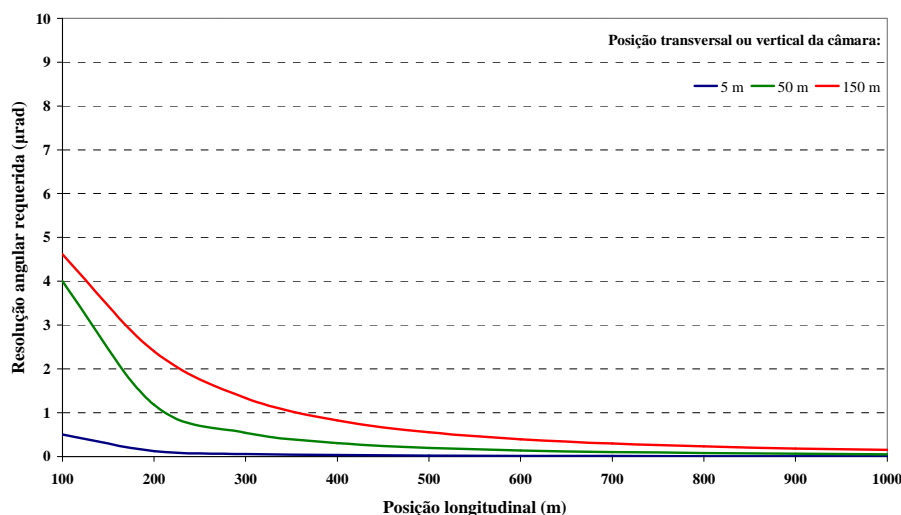


Figura 3.16: Resolução angular requerida para medição de deslocamento de 1 mm na direção longitudinal.

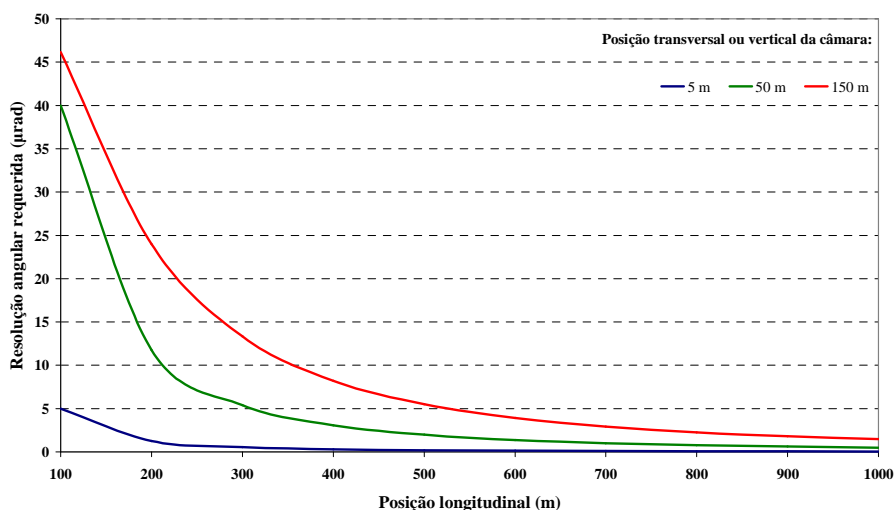


Figura 3.17: Resolução angular requerida para medição de deslocamento de 10 mm na direção longitudinal.

A comparação entre os valores de resolução angular requerida e instrumental, mencionados anteriormente, permite avaliar a sensibilidade das câmaras para a medição de deslocamentos em cenários de observação terrestres de infraestruturas dinâmicas. Considerando uma situação favorável de processamento digital de imagem dos alvos com um nível de exatidão próximo de $\frac{1}{4}$ de píxel, a utilização de uma câmara caracterizada por uma distância focal de 800 mm e um sensor de imagem com píxeis de dimensão linear de $2,5 \mu\text{m}$, a resolução angular instrumental corresponde a $0,8 \mu\text{rad}$ verificando que a câmara é sensível para a medição de deslocamentos transversais ou verticais com magnitude igual a 1 mm. Quanto à medição de

deslocamento longitudinal com a mesma magnitude, a câmara apenas é sensível a este tipo de deslocamento em determinadas posições favoráveis (menor distância de observação e maior desalinhamento longitudinal).

O recurso a uma câmara com menor distância focal (300 mm) e um sensor de imagem com píxeis de dimensão linear mais elevada (10 μm) conduz a uma perda de sensibilidade de medição – a resolução angular instrumental atinge um valor de 8,3 μrad – que se revela insuficiente, na maioria das posições estudadas, para a medição de deslocamentos transversal ou vertical com magnitude de 1 mm. A condição de sensibilidade para este tipo de deslocamentos apenas é respeitada para o caso de deslocamentos com magnitude igual a 10 mm. No caso do deslocamento longitudinal, este tipo de câmara não é sensível para o caso de amplitude igual a 1 mm e, até mesmo em caso de amplitude igual a 10 mm, apenas é sensível em posições com elevado desalinhamento longitudinal e menor distância de observação (menor que 400 m para posição transversal ou vertical de 150 m).

3.3.4 Dimensão global dos alvos

No que respeita aos alvos constituintes do sistema de medição, é necessário garantir que o seu dimensionamento assegure a formação de uma imagem compatível com o nível de exatidão exigido na determinação das respetivas coordenadas imagem dos centros geométricos dos alvos. Em regra, a forma mais simples de alvo corresponde a uma figura geométrica regular do tipo circular – círculo individual ou coroa circular, por exemplo – ou em forma retangular (em cruz ou xadrez) com dimensão global d , conforme ilustrado na Figura 3.18. O conhecimento rigoroso das coordenadas (no mundo e na imagem) do seu centro geométrico é crucial para o nível de exatidão dimensional associado à abordagem óptica estudada.

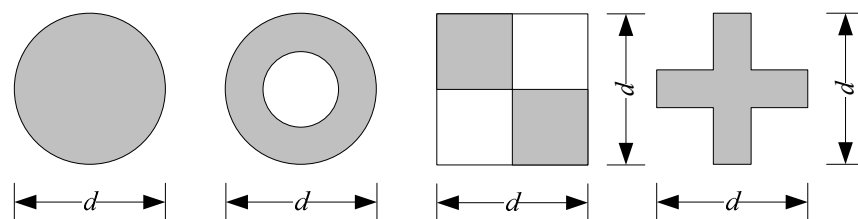


Figura 3.18: Caracterização dimensional de alvos (da esq. para a dir.): círculo individual, coroa circular, xadrez e cruz.

O dimensionamento de alvos visualizados pela câmara é suportado na quantificação da resolução espacial ou *GSD* – *Ground Sample Distance* (termo mais comum nos contextos da Fotogrametria Aérea e da Detecção Remota) – que exprime a dimensão do píxel, p , a uma determinada distância de observação D , e para uma dada distância focal, f , associada à objetiva da câmara, ou seja,

$$GSD = \frac{p \cdot D}{f}. \quad (3.6)$$

O *GSD* define a dimensão mínima do alvo que é possível discriminar espacialmente no sensor de imagem da câmara. Consequentemente, alvos com dimensão superior ao *GSD* abrangem necessariamente um maior número de píxeis no sensor, permitindo uma maior aproximação à forma geométrica real do alvo. A dimensão global do alvo deverá ser igual a um múltiplo ímpar (em regra, 3, 5 ou 7) do *GSD* [Redweik (2010)].

Tendo em conta os intervalos usuais de dimensão do píxel (entre 2,5 μm e 10 μm) e de distância focal elevada (compreendida entre 300 mm e 800 mm) em câmaras comerciais, bem como as distâncias de observação no contexto das grandes obras (entre 100 m e 1000 m), a Figura 3.19 ilustra a variação da dimensão global mínima do alvo para $d = 7 \times GSD$.

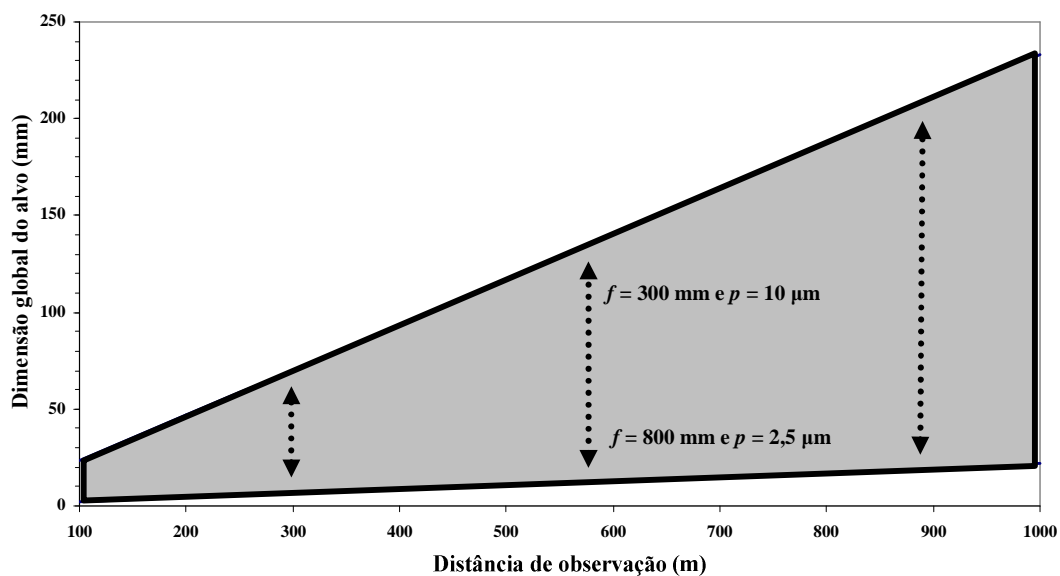


Figura 3.19: Dimensão global mínima do alvo para $7 \times GSD$.

Como se pode observar na Figura 3.19, a dimensão global mínima do alvo pode variar entre, aproximadamente, 2 mm (para câmaras com distância focal de 800 mm, dimensão do píxel igual a 2,5 μm e distância de observação igual a 100 m) e 233 mm (para câmaras com distância focal de 300 mm, dimensão do píxel igual a 10 μm e distância de observação igual a 1000 m).

3.3.5 Campo de visão

O dimensionamento do campo de visão associado à câmara tem por objetivo assegurar uma condição de visualização permanente dos quatro alvos do sistema de medição, tendo em conta a dimensão global do referencial e o deslocamento tridimensional expectável da região de observação na infraestrutura dinâmica.

O campo de visão obtido por um determinado sistema óptico é dependente de três elementos: (i) as dimensões lineares do sensor de imagem de varrimento superficial¹⁶; (ii) a distância focal da objetiva que compõe a câmara; (iii) a distância de observação estabelecida entre a câmara e o referencial de medição.

No que respeita às dimensões lineares do sensor de aquisição de imagem, o Quadro 3.4 apresenta os valores mais usuais, desde o sensor do tipo 1/4" com dimensão mais reduzida (3,6 mm \times 2,7 mm) até ao sensor do tipo 35 mm com dimensão mais elevada (36 mm \times 24 mm) [Edmund (2014)].

Quadro 3.4: Dimensões usuais dos sensores de imagem digital.

Tipo de sensor	1/4"	1/3"	1/2,5"	1/2"	1/1,8"	2/3"	1"	1,2"	35 mm
Dimensão horizontal (mm)	3,6	4,8	5,8	6,4	7,2	8,8	12,8	15,2	36
Dimensão vertical (mm)	2,7	3,6	4,3	4,8	5,4	6,6	9,6	15,2	24
Diagonal (mm)	4,5	6,0	7,2	8,0	9,0	11,0	16,0	21,4	43,3

¹⁶ Excluem-se os sensores de varrimento linear onde a imagem é constituída por linhas obtidas sequencialmente ao longo do tempo. Este tipo de sensores é utilizado sobretudo na aquisição de imagens de objetos com elevada dimensão, em regra, em movimento relativamente ao sensor, exigindo um alinhamento espacial e um tempo de aquisição adequados a esse efeito.

Considerando o intervalo de valores de distância focal elevada, f , compreendido entre 300 mm e 800 mm e o conjunto de distâncias de observação entre 100 m e 1000 m, D , é possível determinar a dimensão do campo de visão, CV , associada ao estudo da observação dimensional terrestre de infraestruturas dinâmicas através da expressão

$$CV = \frac{s \cdot D}{f}, \quad (3.7)$$

onde s corresponde à dimensão linear horizontal ou vertical do sensor. As Figuras 3.20 a 3.23 apresentam as dimensões do campo de visão horizontal e vertical para dois tipos sensores ($1/4''$ e 35 mm, respetivamente) tendo em conta os intervalos de distância de observação e de distância focal com interesse neste estudo.

Com base nestas Figuras é possível concluir que, para o sensor com dimensões mais reduzidas, as dimensões mínimas do campo de visão correspondem a $0,45 \text{ m} \times 0,34 \text{ m}$, podendo atingir valores máximos de $12 \text{ m} \times 9 \text{ m}$. Já no caso do sensor com dimensões mais elevadas, o campo de visão varia entre $4,5 \text{ m} \times 3,0 \text{ m}$ e $120 \text{ m} \times 80 \text{ m}$, dependendo dos valores de distância focal e de observação.

Em qualquer caso, o campo de visão deverá incluir a visualização permanente dos quatro alvos que compõem o referencial de medição e contabilizar o seu deslocamento tridimensional virtual máximo expectável. Para tal, é necessário avaliar a projeção da posição bidimensional dinâmica dos alvos no sensor de imagem, tendo em conta a posição e a orientação tridimensionais da câmara face ao referencial mundo, bem como, os respetivos parâmetros intrínsecos (distância focal, coordenadas do ponto principal e coeficientes de distorção) e as dimensões lineares do píxel e do sensor de imagem.

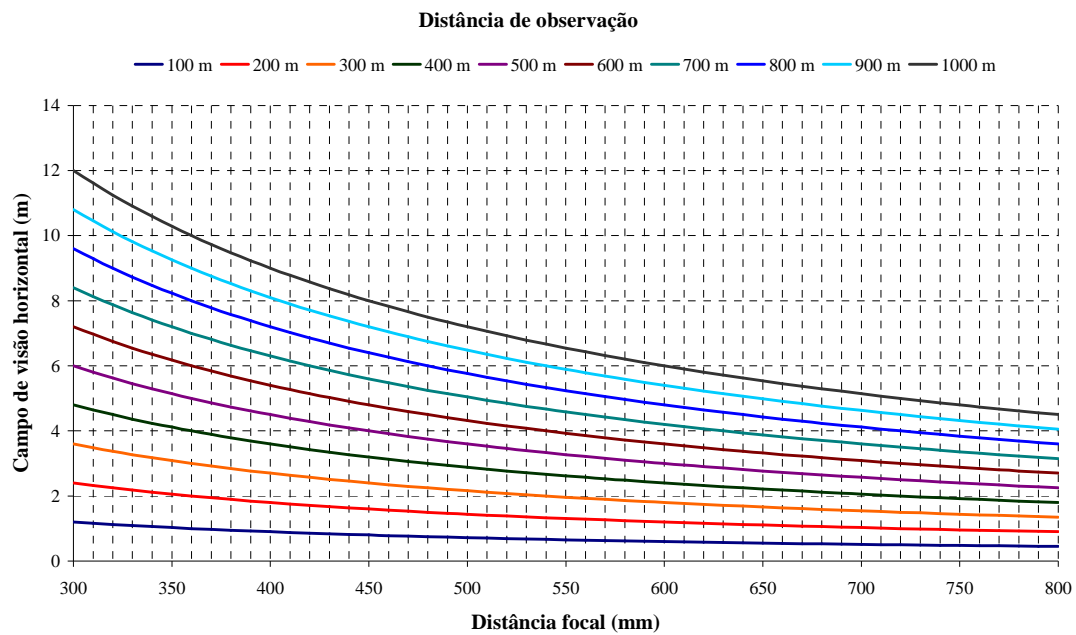


Figura 3.20: Campo de visão horizontal para um sensor com dimensões reduzidas (3,6 mm \times 2,7 mm).

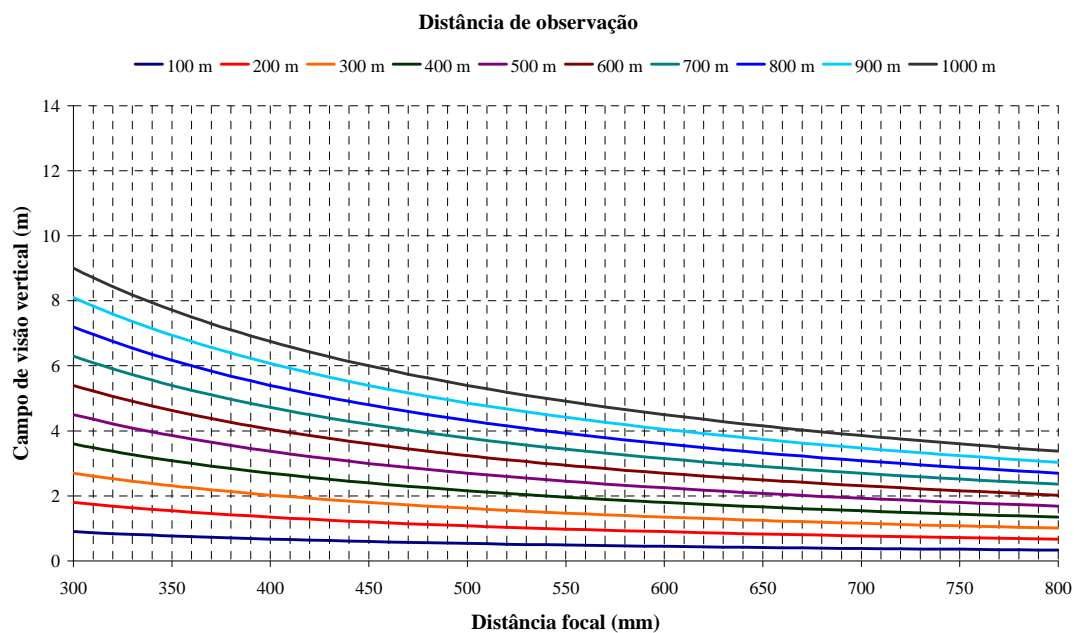


Figura 3.21: Campo de visão vertical para um sensor com dimensões reduzidas (3,6 mm \times 2,7 mm).

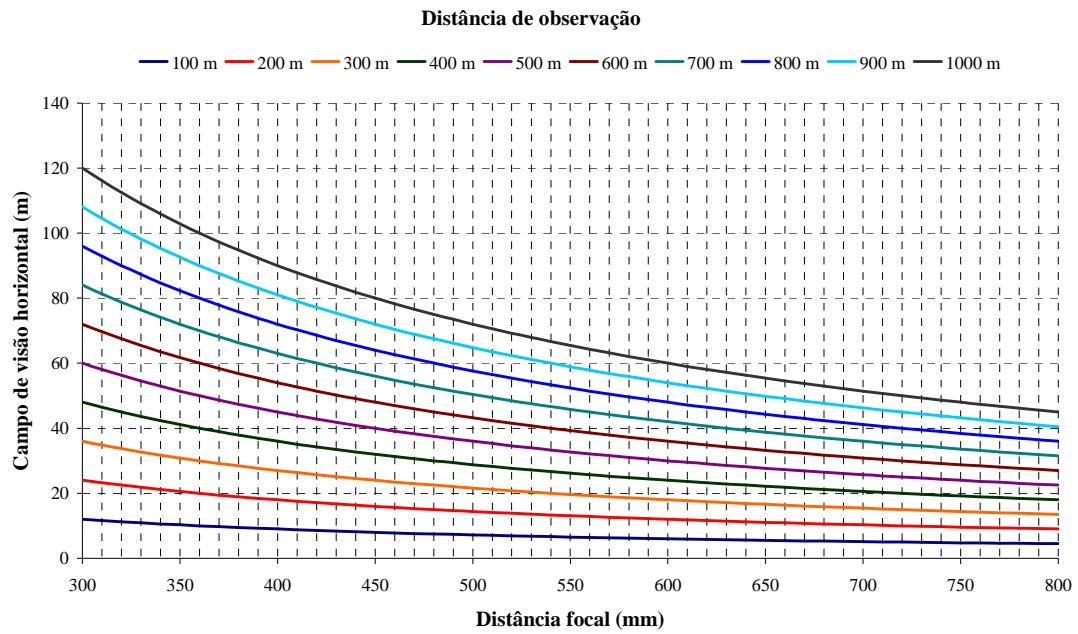


Figura 3.22: Campo de visão horizontal para um sensor com dimensões elevadas (36 mm × 24 mm).

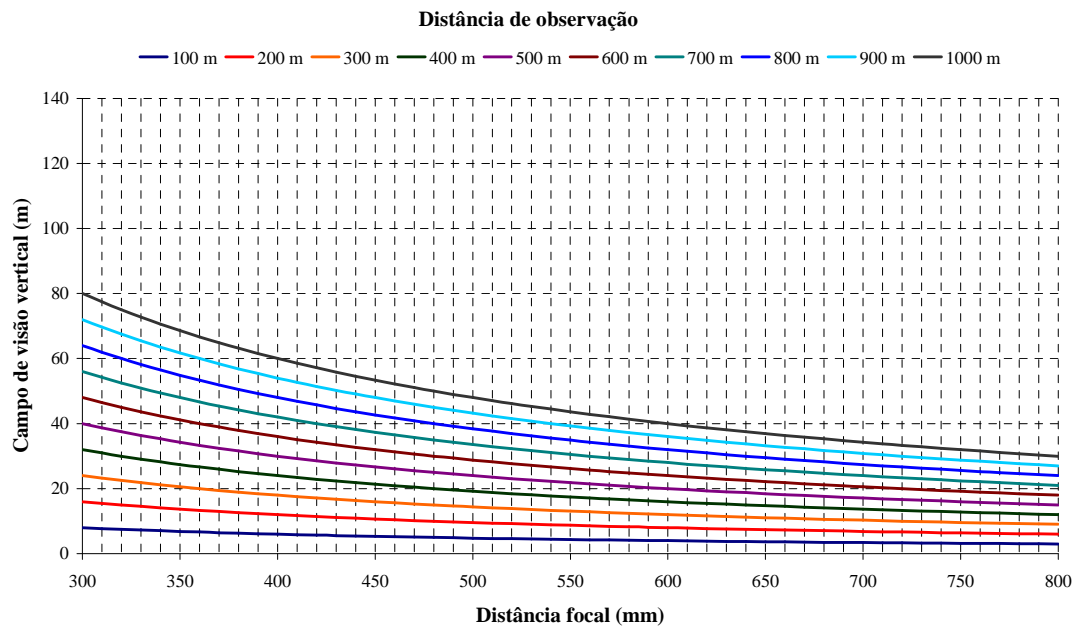


Figura 3.23: Campo de visão vertical para um sensor com dimensões elevadas (36 mm × 24 mm).

3.4 Aquisição e processamento digital de imagens dos alvos

3.4.1 Nota introdutória

Neste sub-Capítulo apresenta-se uma análise das atividades relacionadas com a aquisição e o processamento digital de imagens dos alvos no contexto da abordagem proposta, justificada pela sua contribuição para a qualidade metrológica das coordenadas imagem dos alvos, as quais constituem grandezas de entrada do processo de medição de deslocamento tridimensional da infraestrutura observada.

A análise efetuada está dividida em duas fases – aquisição e processamento – procurando-se, na primeira, apresentar os elementos que caracterizam o processo de aquisição de imagem e determinam a qualidade da imagem inicial que constitui a base de trabalho da segunda fase, onde se apresentam e descrevem as técnicas de processamento aplicáveis às imagens dos alvos tendo em vista a extração das respetivas coordenadas imagem. Esta última etapa de processamento poderá incluir processos de melhoria de qualidade da imagem inicial executados previamente visando, entre outras, a mitigação de ruído mediante uma operação de filtragem, o aumento de contraste do alvo em relação ao meio envolvente e a remoção de efeitos indesejáveis, nomeadamente, arrastamento ou distorção.

3.4.2 Aquisição de imagem

Numa perspetiva matemática, a imagem pode ser vista como uma representação matricial¹⁷ com dimensão finita, composta por um dado número de linhas e colunas, sendo os seus elementos constituintes associados aos píxeis que compõem o sensor de imagem. Cada píxel da imagem possui um nível de quantização, L , dado por

$$L = 2^n, \quad (3.8)$$

em que n corresponde ao número de bits por píxel, definindo o que se designa por profundidade da imagem. Deste modo, cada píxel está associado a um número digital

¹⁷ Em alternativa às imagens digitais matriciais (também designadas por imagens *raster*), existem imagens digitais do tipo vetorial compostas por elementos geométricos bem definidos (curvas, elipses, polígonos, caracteres de texto, entre outros) que permitem o redimensionamento da imagem sem perda de qualidade, sendo possível a sua conversão para imagem matricial para efeito de visualização ou impressão.

compreendido entre 0 e 2^{n-1} (inclusive), requerendo n bits para armazenamento em memória determinando, deste modo, a dimensão computacional da imagem.

Esta escala de número digital exprime a intensidade radiométrica associada a cada píxel da imagem, justificando a designação de *bitmap* atribuída à imagem por constituir um mapeamento de bits onde, em regra, o canto superior esquerdo da imagem constitui a origem do referencial associado ao número de linha e de coluna de cada píxel. O número digital máximo, a profundidade ou o número de bits definem a **resolução radiométrica da imagem** que, deste modo, exprime a capacidade de distinção da diferença de intensidade radiométrica nos objetos visualizados, constituindo um elemento que caracteriza a qualidade da imagem inicial (sem processamento), procurando-se adotar um valor que estabeleça um equilíbrio entre um contraste satisfatório do objeto de interesse (no caso em estudo, os alvos do referencial de medição) em relação ao meio envolvente visualizado e uma dimensão computacional da imagem reduzida. O Quadro 3.5 ilustra a relação computacional entre a dimensão da imagem original e a respetiva profundidade, tendo em conta o número de píxeis do sensor de imagem.

Quadro 3.5: Dimensão computacional de imagem original.

Número de píxeis na imagem (10^6)	Profundidade da imagem (Mbytes)		
	8 bits	10 bits	12 bits
0,3	0,3	0,4	0,5
0,5	0,5	0,6	0,8
0,9	0,9	1,1	1,4
1,2	1,2	1,5	1,8
1,5	1,5	1,9	2,3
1,9	1,9	2,4	2,9
2,5	2,5	3,1	3,8
3,4	3,4	4,3	5,1
4,9	4,9	6,1	7,4

Para além da resolução radiométrica, o **número total de píxeis** é também um elemento de caracterização de dimensão computacional da imagem, frequentemente utilizado de forma incorreta para expressar o nível de detalhe dimensional dos objetos visualizados. Este tipo de resolução é, em regra, expresso por dois números inteiros positivos correspondendo, respetivamente, ao número de linhas e colunas de píxeis do sensor de imagem. Pode também ser expresso, de forma alternativa, pelo número total de píxeis decorrente do produto entre números de linhas e de colunas e posterior

divisão por 10^6 (para expressão comum da dimensão da imagem em megapíxeis). No Quadro 3.6 é possível encontrar alguns valores típicos deste elemento de caracterização da imagem digital para dois sensores recorrentes.

Quadro 3.6: Número de píxeis em alguns sensores de imagem digital

Dimensão do píxel (μm)	Resolução (linhas/mm)	Sensor do tipo 1/2'' Número de píxeis (10^6)	Sensor do tipo 2/3'' Número de píxeis (10^6)
10	50	0,3	0,6
7,5	67	0,5	1,0
6,0	83	0,9	1,6
5,0	100	1,2	2,3
4,5	111	1,5	2,9
4,0	125	1,9	3,6
3,5	143	2,5	4,7
3,0	167	3,4	6,5
2,5	200	4,9	9,3

A resolução radiométrica e o número de píxeis determinam a dimensão computacional da imagem original que, como se observa nos Quadros 3.5 e 3.6, pode atingir valores bastante elevados. Numa perspetiva histórica, surgiram ao longo do tempo diversos formatos de imagem digital visando a redução da sua dimensão computacional mediante o recurso a algoritmos de compressão dedicados, apresentando-se no Quadro 3.7 os formatos mais comuns de câmaras e respetivas características e áreas de aplicação.

Quadro 3.7: Alguns formatos de imagem digital disponíveis em câmaras.

Designação do formato	Extensão	Principais características	Área de aplicação
<i>Bitmap</i>	.bmp	Imagens com elevada dimensão, não sendo aplicado nenhum algoritmo de compressão	Programas do sistema operativo Microsoft Windows
<i>Joint Photographic Experts Group</i>	.jpeg	Imagens com dimensão bastante reduzida em resultado de aplicação de algoritmo de compressão com perda de qualidade de imagem. N.º elevado de cores distintas.	Multimédia e internet
<i>Tagged Image File Format</i>	.tiff	Formato que permite imagens com profundidade radiométrica de 24 bits ou 32 bits (<i>true color</i>).	Impressão industrial e fotografia
<i>Graphics Interchange Format</i>	.gif	Formato de imagem que suporta animações, permitindo 256 cores por imagem.	Internet
<i>Portable Network Graphics</i>	.png	Formato livre (sem algoritmos patenteados) que substituiu o formato gif em 1996, possuindo capacidade de compressão sem perda de qualidade de imagem.	Internet

Atendendo ao elevado grau de rigor dimensional e geométrico exigido para as imagens dos alvos do sistema de medição, é recomendável a utilização do formato BMP ou PNG, de modo a evitar uma significativa perda de qualidade nas imagens decorrente do processo de compressão de dados. Por este motivo, as imagens digitais adquiridas apresentam uma dimensão computacional bastante elevada, sendo

necessário assegurar que o sistema de medição possua uma adequada capacidade de transferência de dados. No Quadro 3.8 são mencionadas as soluções mais comuns de transferência de dados em câmaras [Edmund (2014)].

Quadro 3.8: Soluções para transferência digital em câmaras.

Designação	FireWire 1394.a	FireWire 1394.b	Camera Link [®]	USB 2.0 / USB 3.0	GigE
Taxa de transferência	400 Mbit·s ⁻¹	800 Mbit·s ⁻¹	até 3,6 Gbit·s ⁻¹	480 Mbit·s ⁻¹ / 5 Gbit·s ⁻¹	1 Gbit·s ⁻¹
Comprimento máx. de cabo	4,5 m	100 m	10 m	5 m	100 m
Número de câmaras	até 63		1	até 127	Ilimitado
Tipo de conector	6 pinos / 6 pinos	9 pinos / 9 pinos	26 pinos	USB	RJ45, CAT5 ou CAT6
Placa de aquisição	Opcional		Sim	Opcional	Não
Alimentação elétrica	Opcional		Sim	Opcional	Sim

Como se pode verificar no Quadro anterior, as taxas mais elevadas de transferência de dados estão associadas às tecnologias USB 3.0, Camera Link[®] e GigE, recomendando-se a sua utilização preferencial face às restantes opções.

Por sua vez, a **resolução espacial da imagem** caracteriza o nível de detalhe dimensional de uma imagem expressando, de forma métrica, a capacidade de distinção entre dois objetos próximos na imagem e a sua quantificação depende da distância de observação, da dimensão do píxel e da distância focal do sistema óptico, conforme indicado na expressão 3.6 (secção 3.3.4) . Este elemento é bastante utilizado nos contextos da Fotogrametria Aérea e da Detecção Remota para expressar a qualidade das imagens obtidas por satélites de observação espacial onde, recentemente, se registou uma significativa evolução tecnológica dos sistemas ópticos e consequente melhoria da resolução espacial de imagens da superfície terrestre¹⁸. Por vezes, nesse contexto, este elemento apresenta a designação de GSD – *Ground Sample Distance*, quando se pretende exprimir a dimensão espacial que o píxel do sensor apresenta ao nível da superfície observada. Neste âmbito importa diferenciar a resolução espacial da **resolução geométrica** da imagem, que exprime a dimensão do píxel no dispositivo de visualização (por exemplo, num ecrã), sendo habitualmente expressa em dpi – *dots per inch*.

¹⁸ Refere-se, como exemplo ilustrativo, a evolução da resolução espacial de imagem pancromática de 15 m no satélite Landsat-7 (1999) para 0,5 m no satélite World-View 2 (2009).

No contexto da observação dimensional de infraestruturas dinâmicas tem particular importância a **frequência de aquisição de imagem**, visto expressar o número de imagens obtidas para um mesmo objeto visualizado durante um determinado intervalo de tempo. Com efeito, este elemento delimita a capacidade de análise estrutural dinâmica da obra observada na abordagem óptica proposta. Note-se que a determinação das frequências dos principais modos de vibração da infraestrutura deve respeitar o Teorema da Amostragem na definição da frequência de amostragem (neste caso, de aquisição de imagem), evitando erros de *aliasing*.

Dependendo do tipo de câmara digital utilizada, a frequência de aquisição varia entre 15 a 30 imagens por segundo (ou, segundo a designação anglo-saxónica, *fps – frames per second*) para câmaras usuais e entre 100 e 1000 imagens por segundo para câmaras de elevada velocidade. Novamente, é necessário assegurar um equilíbrio entre a frequência de aquisição (que, em regra, se pretende a mais elevada possível para evitar erros de *aliasing* que comprometam a análise estrutural dinâmica) e a capacidade de transferência de dados da câmara (uma frequência de aquisição demasiado elevada poderá degradar a integridade temporal do processo de transferência de dados decorrente da elevada dimensão computacional das sequências de imagens obtidas).

Por último, menciona-se a **resolução espectral** da imagem, a qual está associada à largura de banda no espectro electromagnético em que o sensor de imagem apresenta uma resposta não-nula considerando-se que quanto maior a resolução espectral da imagem, menor será a largura de banda do sensor. No âmbito da abordagem de medição óptica adotada importa garantir a compatibilidade espectral entre as larguras de banda do sensor de imagem (elemento recetor) e dos alvos ativos (elementos emissores) que compõem o referencial de medição.

3.4.3 Processamento de imagem

No âmbito da abordagem óptica proposta para a medição dimensional de infraestruturas dinâmicas, a atividade de processamento digital de imagem visa, em primeiro lugar, identificar as regiões da imagem onde se visualizam os alvos do referencial de medição e, posteriormente, a determinação das coordenadas dos respetivos centros geométricos, as quais constituem grandezas de entrada do processo de medição desenvolvido.

No que respeita à identificação dos alvos na imagem existem, em regra, duas técnicas principais utilizadas para esse efeito – *template matching* (correspondência por modelo) e *thresholding* (limiarização) – que se descrevem sumariamente em seguida.

A técnica de *template matching* visa a identificação de objetos semelhantes a um objeto modelo na imagem analisada (no caso estudado com a forma geométrica dos alvos do referencial), recorrendo ao cálculo estatístico de correlação cruzada normalizada, ρ_{cc} . Este elemento estatístico exprime, de forma numérica, o grau de proximidade ou semelhança geométrica entre o objeto modelo e a sub-região analisada da imagem, sendo dado por

$$\rho_{cc} = \frac{\sum_{x,y} [f(x,y) - \bar{f}_{u,v}] \cdot [t(x-u, y-v) - \bar{t}]}{\sqrt{\sum_{x,y} [f(x,y) - \bar{f}_{u,v}]^2 \cdot \sum_{x,y} [t(x-u, y-v) - \bar{t}]^2}}, \quad (3.9)$$

onde $f(x,y)$ representa a imagem analisada, t é o objeto modelo posicionado nas coordenadas (u,v) da imagem, $\bar{f}_{u,v}$ o valor médio de intensidade na sub-região analisada e \bar{t} é o valor médio de intensidade do objeto modelo.

Em regra, o objeto modelo é gerado de forma artificial (imagem ideal) ou extraído de uma imagem prévia, apresentando uma dimensão inferior à imagem analisada, pelo que esta técnica promove o cálculo sucessivo da correlação cruzada normalizada em cada uma das sub-regiões possíveis na imagem. No final deste processo é obtido um mapeamento de valores de correlação cruzada normalizada em que as regiões com maior magnitude estão associadas à localização dos objectos geometricamente semelhantes ao objeto modelo. Após identificação destas regiões torna-se possível a aplicação localizada de técnicas de deteção de fronteira ou de correspondência pelo MMQ tendo em vista a determinação das coordenadas dos objetos identificados.

A aplicabilidade desta técnica à determinação das coordenadas imagem dos alvos do referencial é reduzida atendendo, por um lado, à morosidade do processo de varrimento de imagem e cálculo sucessivo de correlação cruzada e, por outro lado, pela elevada complexidade do cenário observado, nomeadamente, a existência de

múltiplos objetos visualizados com dimensão e forma geométrica similar à dos alvos do referencial, tornando difícil a sua diferenciação.

Pelo contrário, a técnica de *thresholding* é caracterizada por uma maior simplicidade e rapidez de execução computacional, promovendo a separação da imagem ou de uma região da imagem em sub-regiões correspondentes a objetos que se pretendem diferenciar do restante meio envolvente observado, ou seja, no caso em estudo permitirá a diferenciação dos alvos em relação ao restante cenário de observação. Nesta técnica, os objetos de interesse estão associados a números digitais distintos da região envolvente estabelecendo-se, de forma interativa pelo observador ou de forma automática pela análise do respetivo histograma de números digitais da imagem, um valor limite de diferenciação entre o objeto de interesse e a sua envolvente e atribuindo a todos os píxeis com número digital acima ou abaixo desse limite, um número digital nulo (tom preto) ou unitário (tom branco). Deste modo, o resultado da operação de *thresholding* é uma imagem binária.

Em determinadas condições de observação, a imagem binária obtida por *thresholding* da imagem original pode conter objetos de dimensão reduzida face à dimensão dos objetos de interesse ou o objeto de interesse poderá estar dividido em vários sub-objetos, pelo que poderá ser necessário recorrer a transformações morfológicas suportadas na Teoria da Lógica de Conjuntos, tendo em vista a identificação dos objetos de interesse.

Neste âmbito, é possível destacar as transformações morfológicas binárias¹⁹ de erosão, ε , e de dilatação, δ , definidas respetivamente pelas expressões

$$\varepsilon_B(X) = \{x : B_x \subset X\}, \quad (3.10)$$

e

$$\delta_B(X) = \{x : B_x \cap X \neq \emptyset\}, \quad (3.11)$$

onde X corresponde a um conjunto binário e B é um elemento estruturante cuja origem se encontra em x . Os elementos estruturantes constituem máscaras com formas geométricas variadas, sendo as mais comuns o quadrado, a linha e o disco

¹⁹ As transformações morfológicas são igualmente aplicáveis a imagens não-binárias com múltiplos números digitais para além do zero e do valor unitário.

caraterizados, respetivamente, pela dimensão do seu lado, comprimento e ângulo de orientação e raio.

Por exemplo, num conjunto de objetos brancos (com número digital unitário) num fundo negro (com número digital igual a zero) numa imagem binária, a transformação morfológica de erosão pode determinar a redução da área do objeto, a eliminação de ligações entre objetos e de pequenas ramificações em objetos individuais e até o desaparecimento dos objetos com menor dimensão, dependendo da dimensão atribuída ao elemento estruturante utilizado. Por sua vez, a transformação morfológica de dilatação pode determinar o crescimento de objetos até uma situação limite de fusão com objetos próximos ou o aumento da área de objetos mais isolados e o preenchimento de vazios no seu interior.

Definem-se, igualmente, as operações morfológicas de abertura, γ , e de fecho, ϕ , resultantes da combinação das operações de erosão e dilatação binárias expressas, respetivamente, por

$$\gamma_B(X) = \delta_B[\varepsilon_B(X)], \quad (3.12)$$

e

$$\phi_B(X) = \varepsilon_B[\delta_B(X)]. \quad (3.13)$$

Deste modo, a transformação morfológica de abertura resulta da aplicação da transformação de dilatação após erosão e de forma recíproca no caso da transformação de fecho, ou seja, erosão após dilatação.

No que respeita à determinação das coordenadas imagem dos alvos, uma das técnicas de processamento cuja adoção se recomenda, pela simplicidade, consiste no cálculo dos respetivos centróides associados: (i) ao perímetro do alvo, em caso de imagem binária contendo apenas a representação da fronteira do alvo; (ii) à imagem binária completa do alvo; (iii) à imagem não-binária (com múltiplos valores digitais) do alvo, simples ou quadrática [Shortis (1994)]. No Quadro 3.9 é possível encontrar as respetivas expressões de cálculo dos centróides onde $DN_{i,j}$ é o número digital associado ao píxel localizado em (i, j) enquanto que (m, n) definem as dimensões da janela de computação do centróide.

Quadro 3.9: Expressões de cálculo de centróides de objetos em imagens digitais.

Tipo de centróide	Perímetro	Simplex	Quadrático
Coordenada x_0	$x_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$	$x_0 = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n i \cdot DN_{i,j}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n DN_{i,j}}$	$x_0 = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n i \cdot DN_{i,j}^2}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n DN_{i,j}^2}$
Coordenada y_0	$y_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$	$y_0 = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n j \cdot DN_{i,j}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n DN_{i,j}}$	$y_0 = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n j \cdot DN_{i,j}^2}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n DN_{i,j}^2}$

Existem técnicas alternativas para determinação do centro geométrico do objeto caracterizadas por um grau de complexidade mais elevado, associadas ao ajuste de funções geométricas bem definidas, nomeadamente, com as formas elíptica e gaussiana. O ajuste da função elipse é suportado no MMQ e é efetuado com base no conjunto de píxeis representativos do perímetro do alvo, em regra, obtidos por aplicação de algoritmo de deteção de fronteira à imagem em análise.

No conjunto de técnicas de processamento disponíveis para esse efeito destaca-se, pela sua utilização recorrente, o detetor de fronteira do tipo Canny que produz como imagem de saída uma imagem binária onde estão assinaladas as descontinuidades (fronteiras ou arestas) da imagem de entrada. Na sua concretização são identificadas as seguintes etapas sequenciais [Canny (1986)]:

- (i) aplicação de filtro gaussiano visando a mitigação de ruído na imagem de entrada;
- (ii) recurso ao operador gradiente para obtenção das respetivas magnitudes e direções na imagem obtida da etapa anterior;
- (iii) execução de processo de supressão de não-máximos, consistindo em análise comparativa entre píxeis individuais e respetivos vizinhos tendo em vista avaliar a possibilidade de constituírem elementos de fronteira;
- (iv) controlo do processo de busca de fronteira através de *thresholding* (são definidos dois limites, T_1 e T_2 com $T_1 > T_2$, verificando-se que a busca só é iniciada num píxel com intensidade maior do que T_1 e cessando quando a intensidade fique abaixo de T_2).

O resultado final do ajuste da elipse inclui as coordenadas imagem do centro geométrico da elipse (x_0, y_0) dado por

$$x_0 = \frac{c \cdot d - b \cdot f}{b^2 - a \cdot c}, \quad (3.14)$$

$$y_0 = \frac{a \cdot f - b \cdot d}{b^2 - a \cdot c}, \quad (3.15)$$

onde o comprimento do semieixo maior, a' , e do menor, b' , correspondem, respetivamente, a:

$$a' = \sqrt{\frac{2(a \cdot f^2 + c \cdot d^2 + g \cdot b^2 - 2b \cdot d \cdot f - a \cdot c \cdot g)}{(b^2 - a \cdot c) \left[-\sqrt{(a-c)^2 + 4b^2} - (a+c) \right]}}, \quad (3.16)$$

$$b' = \sqrt{\frac{2(a \cdot f^2 + c \cdot d^2 + g \cdot b^2 - 2b \cdot d \cdot f - a \cdot c \cdot g)}{(b^2 - a \cdot c) \left[\sqrt{(a-c)^2 + 4b^2} - (a+c) \right]}}, \quad (3.17)$$

e o ângulo de rotação θ entre o eixo x e o eixo maior da elipse, é dado por

$$\theta = \begin{cases} 0 & \text{para } b = 0 \text{ e } a < c \\ \frac{\pi}{2} & \text{para } b = 0 \text{ e } a > c \\ \frac{1}{2} \cotg^{-1} \left(\frac{a-c}{2b} \right) & \text{para } b \neq 0 \text{ e } a < c \\ \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \cotg^{-1} \left(\frac{a-c}{2b} \right) & \text{para } b \neq 0 \text{ e } a > c \end{cases} \quad (3.18)$$

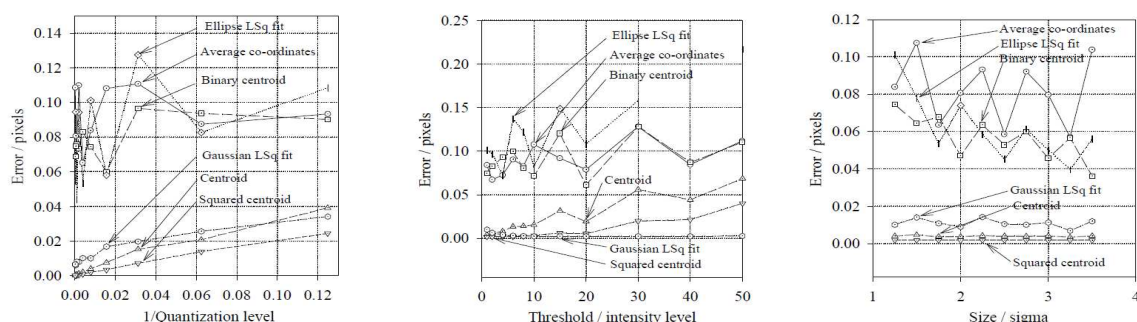
onde a, b, c, d, e, f e g são parâmetros da curva quadrática generalizada.

O ajuste de uma distribuição gaussiana pelo MMQ é suportado pela expressão

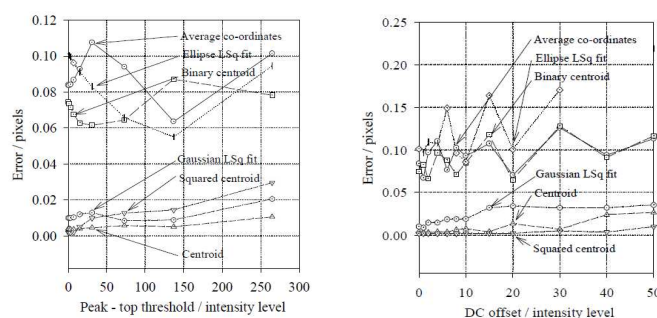
$$DN = f(x, y) = \frac{K}{2\pi \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y \sqrt{1-\rho^2}} \exp \left\{ \frac{-1}{2(1-\rho^2)} \left[\left(\frac{x}{\sigma_x} \right)^2 - 2\rho \cdot \left(\frac{x}{\sigma_x} \right) \cdot \left(\frac{y}{\sigma_y} \right) + \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \right\} \quad (3.19)$$

onde x e y representam os desvios de intensidade em relação ao valor médio, σ_x e σ_y são os respetivos desvios padrão, ρ é o coeficiente de correlação e K constitui um fator de escala.

Os estudos efetuados por [Shortis (1994)] mostraram que o nível de exatidão destas técnicas mais comuns de determinação de coordenadas de objetos, seja pela via do cálculo de centróides seja pela via de ajuste de funções, se situa frequentemente abaixo de 1/6 da dimensão do píxel, mesmo tendo em conta os efeitos de quantização, saturação e desvio sistemático (*offset*) do sinal digital, de variação do limite de *thresholding* e da dimensão do objeto, conforme se mostra nas Figuras 3.24 a 3.28 [Shortis (1994)].



Figuras 3.24 a 3.26: Efeito da quantização (à esq.), do limite de *thresholding* (ao centro) e da dimensão do alvo (à dir.) no nível de exatidão de algumas técnicas de processamento digital.



Figuras 3.27 e 3.28: Efeito da saturação (à esq.) e do *offset* do sinal digital (à dir.) no nível de exatidão de algumas técnicas de processamento digital.

Tendo em conta estes resultados, obtidos por [Shortis (1994)], e comparativamente com a magnitude expectável da componente de incerteza de medição decorrente do efeito de feixe errante por turbulência atmosférica, o impacto da componente de incerteza associada à exatidão sub-píxel das técnicas de processamento digital de imagem referidas anteriormente na incerteza de medição combinada das coordenadas imagem dos alvos é considerado bastante reduzido.

3.5 Modelação geométrica da câmara

3.5.1 Introdução

No contexto de atividade de modelação geométrica do processo de formação de imagens bidimensionais em sistemas ópticos é possível encontrar duas categorias principais²⁰ de modelos de câmara – perspectiva e afim – com potencial aplicação na observação dimensional terrestre de infraestruturas dinâmicas.

O modelo de câmara perspectiva é aplicado, de forma recorrente, em contextos que requerem elevado rigor geométrico, nomeadamente, ao nível da Fotogrametria, onde suporta os processos de triangulação em bloco por feixes perspetivos, dos quais se extraem estimativas relativas à posição e orientação do sistema óptico e às coordenadas mundo de pontos de interesse. Embora seja caracterizado por uma elevada exatidão na representação geométrica do processo de formação de imagem, este tipo de modelo de câmara está associado a uma formulação matemática complexa e não-linear que em situações extremas, nomeadamente, no caso de campos de visão reduzidos (ou seja, distância focal elevada) podem conduzir a problemas de instabilidade numérica.

O estudo de problemas complexos (de reconstrução e reconhecimento de objectos, por exemplo) em Visão Computacional motivou o desenvolvimento de modelos alternativos – modelos de câmara afim – caracterizados por uma maior simplicidade, visto constituírem aproximações ao modelo de perspectiva apresentando, deste modo, uma menor exatidão geométrica. Mencionam-se, neste âmbito, os modelos ortográfico, de perspectiva fraca e de paraperspectiva.

Na concretização da abordagem óptica proposta é utilizado o modelo de câmara perspectiva, dada a sua exatidão na representação geométrica da propagação da luz desde os alvos até ao sensor de imagem, o que ocorre de forma aproximada nos modelos de câmara afim. Em acréscimo e no caso específico do modelo afim ortográfico, é assumida uma localização do centro de projeção da câmara no infinito, o que inviabiliza a aplicação da abordagem de medição proposta na qual se determinam as coordenadas espaciais desse ponto no referencial mundo.

²⁰ Complementarmente, existem igualmente outros tipos de modelos de câmara do tipo não-afim, *pushbroom* e de varrimento linear (não-superficial) [Hartley (2003)].

3.5.2 Câmara perspetiva

Na modelação geométrica de um sistema óptico procura-se descrever o processo de mapeamento entre pontos no mundo tridimensional $\mathbf{X} = (X, Y, Z)^T$ e numa imagem bidimensional $\mathbf{x} = (x, y)^T$, em regra, através de uma representação matricial do modelo de projeção da câmara

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix}, \quad (3.20)$$

onde $\tilde{\mathbf{x}} = (x_1, x_2, x_3)^T$ e $\tilde{\mathbf{X}} = (X_1, X_2, X_3, X_4)^T$ são coordenadas homogêneas²¹ associadas a \mathbf{x} e a \mathbf{X} dadas, respetivamente, por $(x, y) = (x_1/x_3, x_2/x_3)$ e $(X, Y, Z) = (X_1/X_4, X_2/X_4, X_3/X_4)$ em que x_3 e X_4 representam pesos de ponderação. A matriz \mathbf{P} é designada por matriz de projeção, apresentando, na sua forma genérica, 11 graus de liberdade.

Conforme se ilustra na Figura 3.29 [Hartley (2003)], o **centro de projeção** coincide com a origem do sistema de coordenadas e o plano $Z = f$ constitui o plano da imagem ou plano focal, notando que o mapeamento do ponto no espaço é determinado pela interseção da linha que une o ponto no espaço com o centro da câmara no referido plano da imagem.

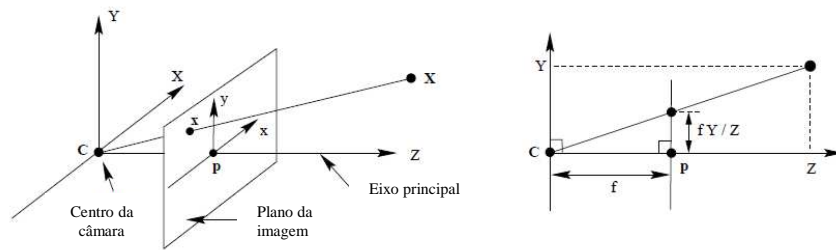


Figura 3.29: Projeção central de ponto do espaço para o plano imagem.

²¹ O recurso a este tipo de coordenadas associadas à Geometria Projetiva (como alternativa às coordenadas cartesianas em Geometria Euclidiana) é justificado pelo facto de permitirem representar pontos localizados no infinito, o que constitui um aspeto relevante na análise de câmaras do tipo afim (com centro de projeção no infinito), tornando o processamento algébrico dos modelos mais simples e simétrico.

Neste tipo de modelo, o centro de projeção é também designado por centro da câmara ou centro óptico enquanto que a linha perpendicular ao plano imagem que passa por este ponto é designada por **eixo principal** ou óptico da câmara. O ponto de interseção do eixo principal com o plano imagem corresponde ao **ponto principal** da câmara. Por sua vez, o plano que contém o centro da câmara e é paralelo ao plano imagem é designado por **plano principal** da câmara. A distância entre os planos principal e imagem constitui a grandeza **distância focal**, f .

A projeção central constitui um mapeamento linear entre as coordenadas homogêneas associadas aos pontos imagem e mundo cuja matriz de projeção corresponde a

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.21)$$

Em regra, a origem do sistema de coordenadas associado ao plano imagem (x, y) não coincide com o ponto principal, contrariamente ao ilustrado na Figura 3.29. Na maioria das câmaras, a origem do sistema de coordenadas imagem coincide com um dos vértices da área sensível do sensor de imagem. Nesta situação, a matriz de projeção central corresponde a

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} f & 0 & p_x & 0 \\ 0 & f & p_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3.22)$$

onde p_x e p_y definem as distâncias métricas nos eixos x e y entre a origem do sistema de coordenadas imagem e o ponto principal, conforme representado na Figura 3.30 [Hartley (2003)].

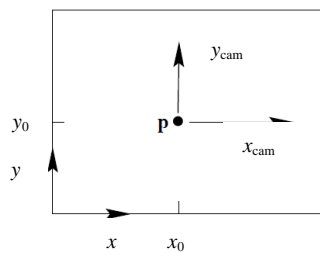


Figura 3.30: Sistemas de coordenadas imagem (x, y) e câmara (x_{cam}, y_{cam}) .

Para além do sistema de coordenadas imagem (x, y) , na modelação geométrica do processo de formação de imagem importa referir (*vide* Figura 3.31) [Hartley (2003)]: (i) o sistema de coordenadas câmara, cuja origem corresponde ao centro de projecção e com eixos x_{cam} e y_{cam} paralelos aos eixos x e y do sistema de coordenadas imagem e eixo z_{cam} coincidente com o eixo principal ; (ii) o sistema de coordenadas mundo (X, Y, Z) , que se diferencia do anterior através de transformação euclidiana por translação (expressa pelo vetor \mathbf{T}) e rotação (definida através de matriz de rotação \mathbf{R}).

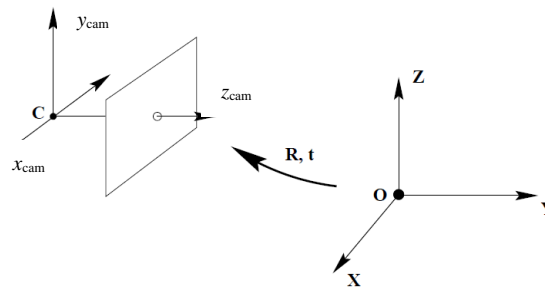


Figura 3.31: Transformação euclidiana entre sistemas de coordenadas mundo e câmara.

Na maioria das câmaras, as coordenadas imagem são expressas em píxeis, o que implica a existência de fatores de escala (m_x, m_y) que definem o número de píxeis por unidade métrica em cada eixo, sendo possível contabilizar o efeito dimensional de píxeis não-quadrados²². Deste modo, a matriz de projecção central é dada por

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3.23)$$

onde $\alpha_x = f \cdot m_x$ e $\alpha_y = f \cdot m_y$ expressam a distância focal da câmara em unidades píxel nas direções x e y , respetivamente, e $u_0 = p_x \cdot m_x$ e $v_0 = p_y \cdot m_y$ são as coordenadas do ponto principal expressas em unidades píxel.

Tradicionalmente, a matriz de projecção anterior pode incluir um parâmetro de enviesamento ou obliquidade (*skew*), s , para contabilizar a ausência de ortogonalidade em caso de píxel não-retangular, o que se traduz na seguinte matriz de projecção

²² Nesta situação é usual recorrer ao parâmetro de proporção (*aspect ratio*), $\zeta = m_x/m_y$, para expressar a diferença dimensional do píxel nas direções x e y .

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \alpha_x & s & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.24)$$

Salienta-se que a maioria das câmaras atuais são constituídas por sensores de imagem com píxeis quadrados, pelo que se assume $\alpha_x = \alpha_y = \alpha$ (parâmetro de proporção unitário) e parâmetro de enviesamento nulo ($s = 0$) sem perda de exatidão no processo de modelação geométrica da câmara, de onde resulta uma matriz de projecção central igual a

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.25)$$

Resumidamente, pode dizer-se que o modelo de perspectiva de projecção de um ponto no espaço com coordenadas homogéneas $\tilde{\mathbf{X}}$ para um ponto com coordenadas homogéneas $\tilde{\mathbf{x}}$ no plano imagem corresponde a

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{P} \tilde{\mathbf{X}} = \mathbf{K} \mathbf{R} [\mathbf{I} - \mathbf{C}] \tilde{\mathbf{X}}, \quad (3.26)$$

onde \mathbf{K} é a matriz dos parâmetros intrínsecos – distância focal e coordenadas do ponto principal, expressas em unidades píxel – dada por

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.27)$$

\mathbf{R} é a matriz de rotação que traduz a orientação da câmara no mundo e \mathbf{C} é o vetor de coordenadas do centro da câmara no mundo (X_0, Y_0, Z_0). Estes dois elementos expressam os parâmetros extrínsecos da câmara.

3.5.3 Equações de colinearidade

As equações de colinearidade são suportadas no modelo de câmara perspectiva e traduzem a propagação retilínea da luz desde o ponto objecto (X, Y, Z) até ao ponto imagem (x, y), passando pelo centro de projecção da câmara (X_0, Y_0, Z_0), correspondendo a

$$\begin{aligned}
x &= u_0 - f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x \\
y &= v_0 - f \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y
\end{aligned} \tag{3.28}$$

que incluem os parâmetros intrínsecos do sistema óptico – f representa a distância focal e (u_0, v_0) são as coordenadas do ponto principal – e onde r_{ij} são os elementos constituintes da matriz de rotação que descreve a orientação tridimensional da imagem relativamente ao sistema de coordenadas mundo. As variáveis Δx e Δy representam as componentes bidimensionais relativas aos desvios de colinearidade associados às perturbações por efeito de distorção da objetiva no processo de formação de imagem²³.

Os trabalhos efetuados por [Brown (1971)] conduziram ao desenvolvimento de modelos matemáticos visando a correção do efeito sistemático de distorção que engloba as contribuições originadas por: (i) distorção radial; (ii) distorção tangencial; (iii) distorção planar. Deste modo, o efeito da distorção total $(\Delta x, \Delta y)$ associada a uma dada objetiva corresponde a

$$\Delta x = \Delta x_{\text{radial}} + \Delta x_{\text{tangencial}} + \Delta x_{\text{planar}}, \tag{3.29}$$

$$\Delta y = \Delta y_{\text{radial}} + \Delta y_{\text{tangencial}} + \Delta y_{\text{planar}}. \tag{3.30}$$

A distorção radial é caracterizada por uma deformação geométrica em que pontos na imagem se afastam – distorção positiva ou em almofada – ou se aproximam – distorção negativa ou em barril – radialmente do seu centro, conforme ilustrado na Figura 3.32 [Hecht (1991)]. A modelação da distorção radial é aproximada por relações polinomiais [Brown (1971)] do tipo

$$\Delta x_{\text{radial}} = x' - x = \bar{x}(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + \dots), \tag{3.31}$$

$$\Delta y_{\text{radial}} = y' - y = \bar{y}(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + \dots), \tag{3.32}$$

²³ Para além da distorção da objetiva, existem outros tipos de aberrações ópticas monocromáticas que afastam a imagem da sua condição ideal, nomeadamente, no que respeita à deformação de imagem (curvatura de campo, para além da distorção) e à redução de nitidez (aberração esférica, coma e astigmatismo). A aquisição de imagens pancromáticas permite não considerar o efeito de aberrações ópticas cromáticas.

onde (x', y') e (x, y) são as coordenadas imagem ideais (não-distorcidas) e reais (distorcidas), respetivamente, K_i são os parâmetros de distorção radial de ordem i , e

$$\bar{x} = x - u_0, \quad (3.33)$$

$$\bar{y} = y - v_0, \quad (3.34)$$

$$r = \left[(x - u_0)^2 + (y - v_0)^2 \right]^{0.5}. \quad (3.35)$$

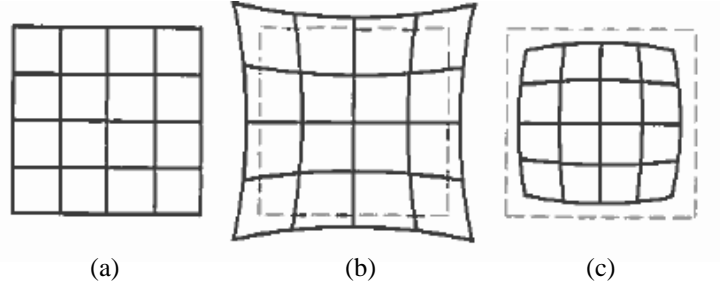


Figura 3.32: Representação do efeito de distorção radial: (a) sem distorção; (b) distorção positiva ou em almofada; (c) distorção negativa ou em barril.

Os parâmetros de distorção radial têm uma forte correlação entre si, sendo possível constar que o parâmetro de 1ª ordem (K_1) apresenta a contribuição mais significativa para a deformação geométrica. O recurso aos parâmetros de ordem superior só é considerado em caso de objetiva normal ou grande angular com reduzida distância focal, permitindo melhorar o nível de exatidão das coordenadas imagem [Stamatopoulos (2011)]. No caso de objetiva com elevada distância focal, o efeito da distorção radial é bastante reduzido pelo que, quando este fenómeno tem algum impacto na exatidão das coordenadas imagem, apenas se considera o parâmetro de 1ª ordem.

A distorção tangencial de uma objetiva é corrigida, de forma aproximada, pelos seguintes modelos de [Brown (1971)]

$$\Delta x_{\text{tangencial}} = x' - x = \left[P_1 (r^2 + 2\bar{x}^2) + 2 P_2 \bar{x} \bar{y} \right] \cdot [1 + P_3 r^2 + \dots], \quad (3.36)$$

$$\Delta y_{\text{tangencial}} = y' - y = \left[2 P_1 \bar{x} \bar{y} + P_2 (r^2 + 2\bar{y}^2) \right] \cdot [1 + P_3 r^2 + \dots], \quad (3.37)$$

onde P_i são os parâmetros de distorção tangencial de ordem i , os quais estão correlacionados com as coordenadas imagem do ponto principal. Este tipo de distorção apresenta uma contribuição pouco significativa (na ordem de grandeza do píxel em regiões extremas da imagem) para a distorção final da objetiva,

nomeadamente, em relação à distorção radial que, em regra, é a contribuição dominante para este tipo de aberração óptica.

As correcções de distorção planar *in-plane*²⁴ ou *shearing* estão associadas à utilização de câmaras com píxeis não-quadrados, procurando corrigir a eventual falta de ortogonalidade e uniformidade dimensional ao nível do plano imagem, sendo modelada por

$$\Delta x_{\text{planar}} = B_1 x' + B_2 y', \quad (3.38)$$

$$\Delta y_{\text{planar}} = 0, \quad (3.39)$$

em que B_1 e B_2 são os parâmetros de distorção linear. Como a maioria das câmaras atuais é composta por sensores de imagem com píxeis quadrados caracterizados por elevada integridade posicional e geométrica, este tipo de distorção é cada vez mais desprezado na correção das coordenadas imagem.

O processo geral para a obtenção de solução para as equações de colinearidade foi estabelecido por Duane Brown em 1958 [Brown (1971)], sendo designado por Ajuste de Feixes Perspetivos (*Bundle Adjustment*, na designação anglo-saxónica) visto promover o ajustamento dos feixes luminosos provenientes de um objeto posicionado num espaço tridimensional que convergem para o centro de projeção perspetiva da câmara. A solução obtida pode traduzir coordenadas mundo de pontos de interesse no espaço tridimensional anteriormente desconhecidos e incluir, de igual forma, os parâmetros extrínsecos (posição espacial e orientação da câmara) e intrínsecos (distância focal, coordenadas imagem do ponto principal e coeficientes de distorção da objetiva, entre outros). Neste último caso – parâmetros intrínsecos incógnitos – o processo apresenta a designação de Ajuste de Feixes Perspetivos com Auto-calibração²⁵ (*Self-calibrating Bundle Adjustment* na designação anglo-saxónica).

Para garantir a concretização deste processo, é necessário efetuar a linearização das equações de colinearidade (de natureza não-linear, *vide* expressão 3.28) mediante expansão em série de Taylor, em regra, de primeira ordem,

²⁴ Exclui-se a distorção planar do tipo *out-plane* associada à falta de planeza no plano imagem que ocorre, sobretudo, em câmaras analógicas.

²⁵ Salienta-se que o termo “auto-calibração” foi criado em contexto fotogramétrico, não respeitando a definição metrológica de “calibração”, conforme prescrita em [VIM (2012)].

o que assegura a possibilidade de aplicação do MMQ, sendo necessário nesse caso atribuir um conjunto de valores iniciais às incógnitas. Após esta linearização, o Ajuste de Feixes Perspetivos com Auto-calibração é expresso por

$$\mathbf{A}_1 \mathbf{x}_1 + \mathbf{A}_2 \mathbf{x}_2 + \mathbf{A}_3 \mathbf{x}_3 = \mathbf{b}, \quad (3.40)$$

em que os vectores \mathbf{x}_1 e \mathbf{x}_2 representam, respetivamente, as incógnitas associadas aos parâmetros intrínsecos (em aplicações fotogramétricas, este vetor inclui oito elementos, $f, u_0, v_0, K_1, K_2, K_3, P_1$ e P_2) e parâmetros extrínsecos (as coordenadas X_0, Y_0, Z_0 do centro de projecção e os ângulos de Euler ω, φ, κ), e \mathbf{x}_3 é o vetor de coordenadas mundo de um dado ponto no espaço tridimensional. Por sua vez, o vetor \mathbf{b} reúne as discrepâncias entre valores aproximados e observados enquanto que as matrizes \mathbf{A}_i são designadas por matrizes de configuração, compostas pelas derivadas parciais associadas aos parâmetros intrínsecos, extrínsecos e coordenadas mundo de pontos.

A expressão anterior pode ser escrita sob a forma de equações normais mediante

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{b} = \mathbf{0}, \quad (3.41)$$

onde se incluiu a matriz de pesos \mathbf{P} , que permite atribuir pesos de ponderação diferenciados às observações disponíveis. As estimativas da solução do sistema de equações normais correspondem a

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{u}, \quad (3.42)$$

onde $\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A}$ e $\mathbf{u} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{b}$.

A matriz variância-covariância dos parâmetros estimados é dada por

$$\mathbf{C}_{\hat{\mathbf{x}}} = \sigma_0^2 \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}}, \quad (3.43)$$

em que $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}}$ é a matriz cofator dos parâmetros correspondendo a

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{N}^{-1}, \quad (3.44)$$

e σ_0^2 é a variância *a priori* que, nesta situação, é calculada através de

$$\sigma_0^2 = \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{m - n}, \quad (3.45)$$

onde m é o número de observações e n é o número de incógnitas e o vetor de resíduos que corresponde a $\mathbf{v} = \mathbf{Ax} - \mathbf{b}$.

Nos casos em que não é possível expressar as equações de colinearidade de forma explícita (por exemplo, quando se considera o desvio de colinearidade por efeito de distorção da objetiva), é necessário recorrer à forma generalizada do MMQ.

As soluções obtidas por aplicação do MMQ constituem correções aproximadas dos valores iniciais previamente estabelecidos, o que permite definir um processo iterativo com base na aplicação sucessiva de correções até se obter um valor residual, sem impacto significativo na exatidão das soluções finais obtidas para as incógnitas em questão.

Em qualquer dos casos – expressão implícita ou explícita das equações de colinearidade – a obtenção de uma solução para o sistema de equações normais implica a determinação da matriz inversa de \mathbf{N} . Na concretização desta tarefa é possível recorrer a métodos diretos ou iterativos.

Os métodos diretos são caracterizados por um número finito de etapas e conduzem a uma solução exata para o problema da inversão da referida matriz, sendo particularmente adequados para o caso de inversão de matrizes com todos os elementos constituintes diferentes de zero. No conjunto de métodos diretos é efetuada a distinção entre métodos que promovem a fatorização triangular²⁶ do sistema de equações seguida de substituição direta ou inversa, e métodos de fatorização ortogonal²⁷ de que resultam matrizes unitárias e diagonais de onde uma solução pode ser obtida de forma simples [Stamatopoulos (2011)].

Os métodos iterativos envolvem o recurso a processos de otimização donde se extrai uma sequência de soluções aproximadas sendo bastante mais rápido do que os métodos diretos e particularmente adequado para o caso de matrizes esparsas (constituídas, maioritariamente, por elementos nulos) de grande dimensão.

Na escolha de um determinado método deve ser ponderada a estabilidade numérica, a velocidade do processo de cálculo e o tipo de sistema (bem-condicionado

²⁶ Mediante eliminação gaussiana e factorização LU ou por decomposição de Choleski.

²⁷ Inclui-se nesta sub-categoria de métodos diretos, a reflexão de Householder e as rotações de Givens, o processo Gram-Schmidt, a fatorização QR, as decomposições de Schur, de valores próprios e de valor singular (SVD) [Stamatopoulos (2011)].

ou mal-condicionado), consoante o impacto que pequenas perturbações nas medições tenham na alteração das estimativas dos parâmetros.

[Stamatopoulos (2011)] refere que se deve evitar, sempre que possível, o estabelecimento de equações normais, recomendando o método ortogonal QR para a inversão da matriz \mathbf{N} . Caso exista recurso às equações normais, então deve ser usado o método de fatorização de Choleski, atendendo à sua velocidade e estabilidade. Na presença de um sistema mal-condicionado, este deve ser resolvido preferencialmente com um método de otimização recomendando, no caso de recurso a método direto, a utilização do método ortogonal SVD – *Singular Value Decomposition*.

Caso subsistam problemas de instabilidade numérica decorrentes da aplicação do MMQ, é necessário recorrer a métodos numéricos de otimização não-linear das equações de colinearidade. Embora não seja necessário efetuar a linearização das equações de colinearidade, como no MMQ, continua a ser necessário estabelecer valores iniciais para as incógnitas e definir critérios de interrupção do processo iterativo visando atingir a convergência do processo para as pretendidas soluções das estimativas.

3.6 Influência do meio de propagação

3.6.1 Introdução

O meio de propagação – ar atmosférico – existente entre a câmara e o conjunto de alvos pode exercer uma influência relevante no processo de medição proposto, afetando o nível de exatidão dimensional e podendo determinar a inoperacionalidade do sistema de medição em caso de condições atmosféricas adversas (por exemplo, nevoeiro intenso), sobretudo, num cenário de observação contínua e a longo prazo. No estudo da influência de fenómenos atmosféricos na observação dimensional de infraestruturas dinâmicas por via óptica têm particular interesse:

- (i) a atenuação da radiação emitida pelos alvos ativos em condições atmosféricas adversas, dos quais resulte uma significativa redução da visibilidade dos alvos a longa distância (entre 100 m e 1000 m), nomeadamente, com a ocorrência de precipitação (nevoeiro, chuva ou neve).
- (ii) a refração atmosférica resultante da existência de gradientes térmicos no meio de propagação, originando gradientes do índice de refração que implicam uma

alteração da trajetória retilínea dos feixes luminosos entre os alvos e a câmara, criando posições virtuais ou aparentes dos alvos (coordenadas mundo);

- (iii) a turbulência atmosférica no cenário de observação, que se pode manifestar de três modos possíveis – feixe errante, cintilação e divergência – afetando o nível de exatidão das coordenadas imagem dos alvos.

Nas secções que se seguem faz-se uma descrição global dos fenómenos atmosféricos apontados, visando a mitigação dos seus efeitos adversos no processo de medição óptica proposto, quer na seleção do comprimento de onda com menor susceptibilidade à atenuação atmosférica quer na quantificação e correção dos efeitos de refração ou turbulência atmosférica.

3.6.2 Atenuação atmosférica

3.6.2.1 *Nota introdutória*

A atenuação atmosférica constitui um fenómeno que pode ser prejudicial ao processo de medição óptica, visto contribuir para a redução da visibilidade dos alvos a longa distância. Em situações extremas, como na ocorrência de nevoeiro intenso, pode determinar inclusivamente a inoperacionalidade do sistema de medição. O conhecimento deste fenómeno é essencial para a seleção do comprimento de onda da radiação emitida pelos alvos ativos, dada a relação existente entre esta característica da radiação eletromagnética e a atenuação atmosférica. Com efeito, a radiação utilizada deverá possuir um comprimento de onda menos afetada pela atenuação atmosférica. Como a maioria das soluções disponíveis de câmaras e de LEDs apresenta uma sensibilidade espectral na radiação visível e infravermelha, é importante conhecer como ocorre o fenómeno da atenuação atmosférica nestas regiões de interesse do espectro eletromagnético.

A atenuação atmosférica é originada pela interação da luz com o conjunto de gases²⁸ e partículas²⁹ sólidas e líquidas suspensas no ar (aerossóis) caracterizada por uma elevada variabilidade dimensional como se mostra no Quadro 3.10 [Kim (2001)].

²⁸ Por ordem decrescente de volume junto à superfície terrestre: azoto (N₂), oxigénio (O₂), vapor de água (H₂O), árgon (Ar), dióxido de carbono (CO₂), néon (Ne), hélio (He), metano (CH₄), cripton (Kr), hidrogénio (H₂), óxido de azoto (N₂O), monóxido de carbono (CO), xénon (Xe), ozono (O₃), dióxido de azoto (NO₂), iodo (I) e amoníaco (NH₃).

Quadro 3.10: Dimensão característica dos elementos constituintes da atmosfera terrestre.

Tipo de elemento	Dimensão (μm)	Tipo de precipitação	Dimensão (μm)
Moléculas de gás	0,000 1	Chuva	100 – 10 000
Partículas de neblina	0,01 – 1	Neve	1000 – 5000
Gotículas de nevoeiro	1 – 20	Granizo	5000 – 50000

Esta interação com os elementos constituintes da atmosfera terrestre decorre segundo dois processos – a absorção e a dispersão – cuja descrição é efetuada nas sub-seções seguintes.

3.6.2.2 Absorção

A absorção corresponde a um processo quântico em que as moléculas de gases atmosféricos recebem energia de fótons incidentes, necessária à alteração do seu estado de vibração ou de rotação molecular e transição para um nível energético superior, contribuindo para o aumento da sua energia térmica, podendo posteriormente transitar para um nível energético mais baixo originando nova emissão de radiação num comprimento de onda diferente da radiação incidente.

Nas regiões espectrais do visível e do infravermelho, as moléculas de oxigénio, água, dióxido de carbono e ozono são responsáveis por diversas bandas de absorção, conforme se observa na Figura 3.33 [Willebrand (2001)], notando-se que a região do infravermelho próximo é caracterizada por uma absorção dominante por parte das moléculas de água enquanto que, no restante espectro do infravermelho, se observa uma absorção combinada das moléculas de água, dióxido de carbono e ozono.

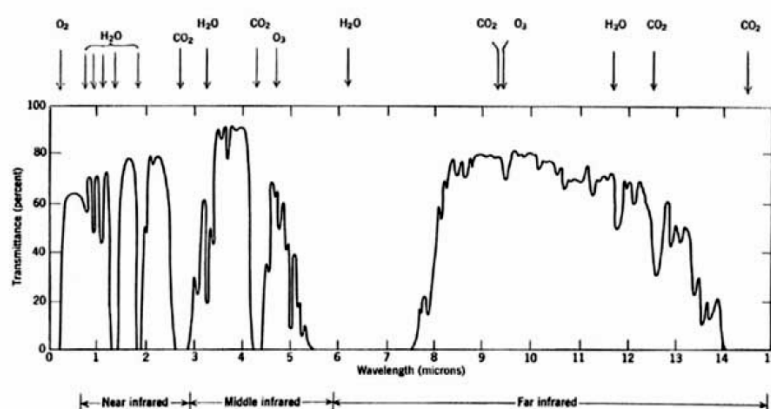
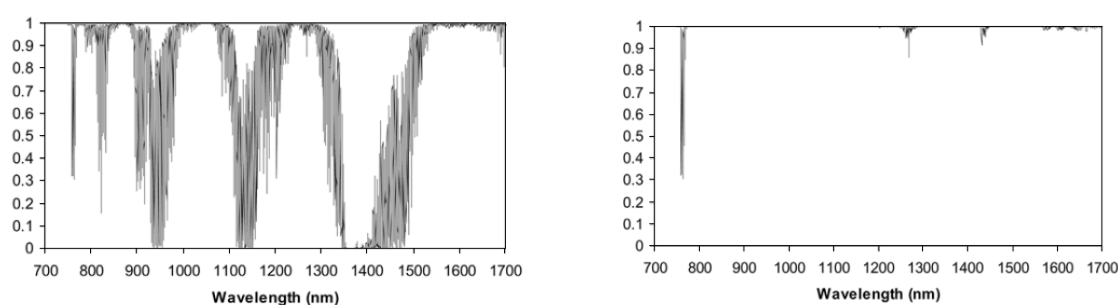


Figura 3.33: Transmitância atmosférica ao nível do mar (medida num trajeto horizontal de 1820 m).

²⁹ De natureza inorgânica (gotículas de água, cristais de gelo, poeiras finas, sal marinho), de natureza orgânica (pólen, esporos, bactérias) e de natureza poluente (fumos e poeiras).

A concentração destes elementos constituintes no meio de propagação determina a magnitude do fenómeno de absorção e a sua consequente contribuição para a atenuação dos feixes luminosos. Cenários de observação próximos de regiões fluviais e marítimas apresentam, em regra, maior quantidade de vapor de água pelo que a absorção seletiva se manifesta de forma mais intensa, tal como no caso de regiões associadas a elevado nível de poluição com a presença significativa de dióxido de carbono e ozono.

O recurso a modelos computacionais de simulação da propagação atmosférica permite que se estime a relação entre a transmitância e o comprimento de onda para os casos particulares de absorção por moléculas de água (Figura 3.34) e por moléculas de dióxido de carbono (Figura 3.35), na condição de céu limpo e na gama espectral do infravermelho próximo [Willebrand (2001)].

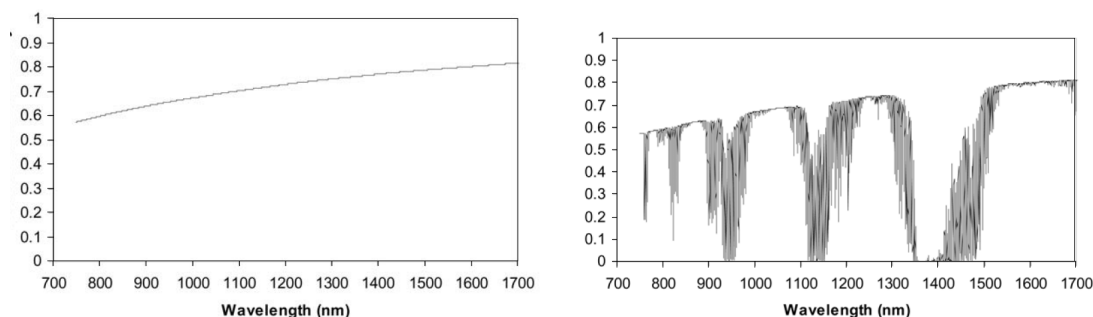


Figuras 3.34 e 3.35: Relação entre a transmitância e o comprimento de onda com absorção molecular da água (à esq.) e do dióxido de carbono (à dir.)

No caso da absorção molecular da água, é possível identificar várias janelas de bloqueamento atmosférico (desfavoráveis para o caso em estudo) centradas em torno dos comprimentos de onda de 950 nm, 1150 nm e 1400 nm enquanto que, no caso do dióxido de carbono, salienta-se a existência de um pico de elevada amplitude de absorção próximo de 750 nm e de dois picos de menor amplitude em torno de 1250 nm e 1450 nm.

Em acréscimo à absorção por moléculas gasosas da atmosfera, as partículas suspensas no ar atmosférico contribuem, também, para o fenómeno da absorção atmosférica, como se verifica na Figura 3.36 [Willebrand (2001)] apresentando a relação entre a transmitância e o comprimento de onda obtida por simulação computacional para ambiente urbano. A combinação das contribuições da absorção molecular e dos aerossóis em ambiente urbano origina a relação entre a transmitância

e o comprimento de onda, ilustrada na Figura 3.37 para uma condição de visibilidade de 5 km [Willebrand (2001)].



Figuras 3.36 e 3.37: Relação entre a transmitância e o comprimento de onda com absorção por aerossóis (à esq.) e a absorção global - absorção combinada por moléculas de água, dióxido de carbono e aerossóis em ambiente urbano (à dir.).

A análise das Figuras 3.36 e 3.37 evidencia que a presença de aerossóis na atmosfera origina um decréscimo generalizado da transmitância, que é mais acentuado para radiação com menor comprimento de onda. Contudo, a absorção por moléculas de água permanece dominante na definição de janelas de bloqueamento e de transmissão atmosférica.

Os resultados apresentados sustentam o uso recorrente³⁰ de fontes emissoras com comprimento de onda associado a janelas de transmissão (onde o fenômeno da absorção é desprezável) na região espectral do vermelho e infravermelho próximo, designadamente, em comprimentos de onda próximos de 785 nm, 850 nm e 1550 nm, notando que a maioria dos sensores de imagem não possui uma sensibilidade espectral aceitável para o valor mais elevado. Nas janelas de transmissão referidas, a dispersão constitui a fonte de atenuação atmosférica dominante, resultando da colisão de fótons com as moléculas gasosas e com as partículas que a radiação encontra no seu trajeto de propagação.

3.6.2.3 Dispersão

Este tipo de interação é caracterizado pelo redirecionamento ou redistribuição da radiação incidente sem que ocorra absorção de energia por parte da molécula ou partícula após a colisão. Com efeito, no final do trajeto de propagação, a dispersão potencia uma perda significativa da intensidade da luz na direção inicial de

³⁰ Na transmissão óptica de informação a longa distância ou FSO.

propagação da radiação que atinge um dado elemento recetor com área sensorial finita, incapaz de captar todos os fótons emitidos inicialmente.

A dimensão característica das moléculas gasosas e partículas, r , e o comprimento de onda da radiação, λ , determinam a existência de três regimes de dispersão (*vide* Figura 3.38) [Kim (2001)]:

- (i) a dispersão de Rayleigh, em que $x_0 = 2 \cdot \pi \cdot r / \lambda \ll 1$;
- (ii) a dispersão de Mie, onde se verifica que $x_0 = 2 \cdot \pi \cdot r / \lambda \approx 1$;
- (iii) a dispersão geométrica ou não-seletiva, em que $x_0 = 2 \cdot \pi \cdot r / \lambda \gg 1$.

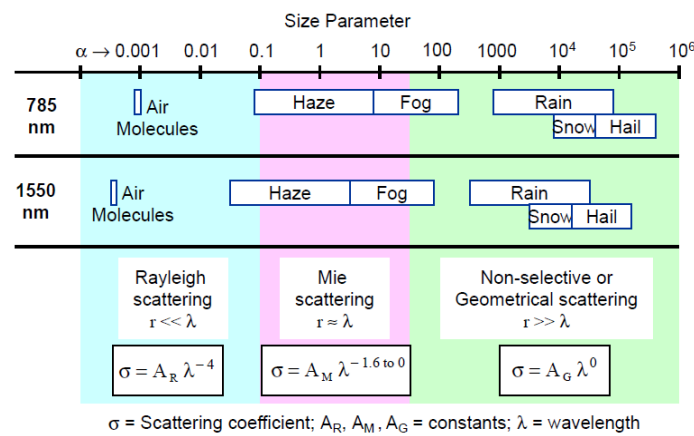


Figura 3.38: Representação esquemática da relação entre a dimensão característica, as condições atmosféricas e os tipos de dispersão.

A dispersão de Rayleigh resulta da ação do campo elétrico da onda de radiação incidente sobre os eletrões de valência de moléculas gasosas e partículas (com dimensão muito inferior ao comprimento de onda da radiação incidente) que passam a oscilar à mesma frequência da radiação incidente. Este movimento de oscilação dos eletrões é responsável pela radiação de luz sob a forma de uma onda dispersiva atuando, sobretudo, nos sentidos inicial e oposto à direção de propagação da radiação incidente.

Neste contexto, a secção transversal de dispersão, σ_s , constitui uma medida da magnitude deste tipo de interação entre luz e matéria, cuja quantificação é obtida pela fórmula clássica de Rayleigh [Willebrand (2001)] expressa por

$$\sigma_s = \frac{\nu \cdot e^4 \cdot \lambda_0^4}{6 \cdot \pi \cdot \epsilon_0^2 \cdot m^2 \cdot c^4} \frac{1}{\lambda^4}, \quad (3.46)$$

em que ν é a frequência de oscilação, e é a carga do eletrão, λ_0 é o comprimento de onda correspondente à frequência natural, $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot c / \lambda_0$, ϵ_0 é a constante dielétrica no vazio, c é a velocidade da luz e m é a massa da partícula oscilante. A expressão anterior permite concluir que quanto maior o comprimento de onda, menor será o efeito da dispersão de Rayleigh, conforme se ilustra na Figura 3.39, notando que, para a gama espectral do infravermelho próximo, este fenómeno possui uma magnitude bastante reduzida.

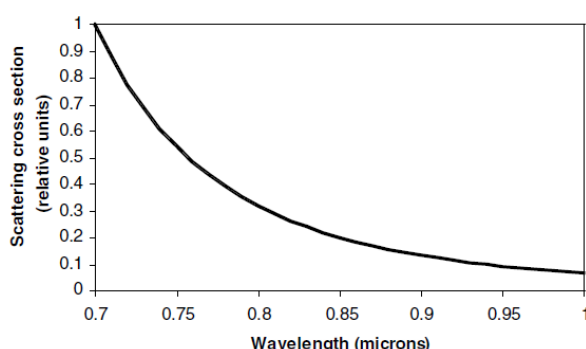


Figura 3.39: Secção transversal de dispersão de Rayleigh em função do comprimento de onda de radiação no infravermelho próximo.

Quanto à dispersão de Mie, esta torna-se relevante quando o comprimento de onda da radiação incidente é próximo da dimensão dos elementos constituintes da atmosfera. No infravermelho próximo esta condição é verificada em caso de neblina ou nevoeiro, atendendo à dimensão das gotículas de água que os compõem ou, no caso de presença de outro tipo de partículas suspensas (por exemplo, poluentes) com dimensão similar. A atenuação originada por este tipo de dispersão tende a manifestar-se de forma mais significativa com o aumento do percurso óptico da luz em comparação com a variação do comprimento de onda.

No espectro visível e no infravermelho próximo, durante a ocorrência de nevoeiro intenso, chuva, neve ou granizo, a dispersão geométrica contribui para a atenuação atmosférica, visto que a dimensão das gotículas de água e cristais de gelo é superior aos valores de comprimento de onda associados às referidas gamas espectrais. Nesta situação, é possível recorrer à Óptica Geométrica para avaliação da distribuição angular da radiação.

Este tipo de dispersão é traduzida na divergência do feixe luminoso à medida que se afasta da fonte emissora, podendo a sua área transversal ultrapassar a abertura

óptica do recetor, conduzindo a uma diminuição do número de fótons que alcança a área sensível. Para a minimização deste efeito de atenuação poderá contribuir a utilização de aberturas ópticas com diâmetro mais elevado e de fontes emissoras com menor ângulo de divergência. A designação de dispersão não-seletiva provém do facto deste tipo de dispersão ser independente do comprimento de onda.

A Lei de Beers-Lambert permite combinar os efeitos da absorção e da dispersão na atenuação atmosférica, expressando a transmitância τ através de

$$\tau = \frac{I_r}{I_0} = \exp(-\gamma \cdot x), \quad (3.47)$$

onde I_r é a intensidade detetada à distância x , I_0 é a intensidade inicialmente emitida e γ é o coeficiente de atenuação que corresponde a

$$\gamma = \alpha_m + \alpha_a + \beta_m + \beta_a, \quad (3.48)$$

onde se identificam as parcelas relativas aos coeficientes de dispersão molecular, α_m , e aerossol, α_a , e os coeficientes de absorção molecular, β_m , e aerossol, β_a , notando que cada coeficiente mencionado é dependente do comprimento de onda da radiação.

Na região do infravermelho próximo, as contribuições da absorção molecular e aerossol, bem como da dispersão de Rayleigh, são reduzidas, permitindo que o coeficiente de atenuação total seja expresso, de forma aproximada, pelo coeficiente de dispersão associado às partículas sólidas e líquidas suspensas na atmosfera (aerossóis) com dimensão próxima (dispersão de Mie) ou muito superior (dispersão geométrica) ao comprimento de onda na região do infravermelho próximo. A magnitude do coeficiente de atenuação está dependente das condições atmosféricas associadas ao cenário de observação, apresentando valores mínimos próximos de zero em condições de visibilidade³¹ favoráveis (atmosfera límpida ou muito límpida) e máximos em condições desfavoráveis de visibilidade (nevoeiro denso), conforme se apresenta no Quadro 3.11 [Willebrand (2001)].

³¹ No contexto da observação terrestre de infraestruturas, a visibilidade constitui uma métrica da transparência atmosférica, permitindo definir a distância a partir da qual não é possível discriminar um objeto do meio envolvente.

Quadro 3.11: Gamas de visibilidade para diferentes condições atmosféricas.

Condição atmosférica		Visibilidade
Nevoeiro cerrado	Neve	< 50 m
Nevoeiro intenso		50 m – 250 m
Nevoeiro moderado		250 m – 500 m
Nevoeiro ligeiro		500 m – 1000 m
Nevoeiro muito ligeiro		1 km – 2 km
Neblina		2 km – 5 km
Neblina ligeira		5 km – 10 km
Ar límpido		10 km – 20 km
Ar muito límpido		> 20 km

A teoria eletromagnética da dispersão, desenvolvida por Gustav Mie no século XX, permite determinar o coeficiente de atenuação por dispersão com base no conhecimento da distribuição e da dimensão das partículas no meio de propagação óptica e da eficiência de dispersão. Contudo, do ponto de vista operacional, a elevada variabilidade temporal e espacial de partículas em suspensão no ar atmosférico (dependente de fatores como a localização geográfica, a sazonalidade diária e anual, a humidade relativa, a velocidade do vento, entre outros) dificultam a concretização prática da abordagem teórica desenvolvida para o cálculo do coeficiente de atenuação por dispersão. Como alternativa, é possível recorrer a modelos paramétricos de natureza empírica do tipo

$$\gamma = A \cdot \lambda^{-q}, \quad (3.49)$$

em que A e q são parâmetros que dependem da distribuição e da dimensão das partículas que compõem o ar. Em regra, o parâmetro A está associado à visibilidade do cenário de observação enquanto que o parâmetro q é determinado experimentalmente, tendo em conta o impacto do comprimento de onda na atenuação e o tipo de dispersão.

3.6.3 Refração atmosférica

A refração constitui um fenómeno óptico que se manifesta na alteração da direção ou velocidade da luz, consoante a variação espacial e temporal do índice de refração associado ao meio de propagação. Referem-se, como exemplos, os seguintes casos:

- (i) em laboratório, na medição dimensional com recurso a interferómetros laser, efetua-se a medição das condições ambientais de modo a determinar o índice

de refração do meio, corrigindo-se a velocidade do feixe laser no vácuo para o ambiente laboratorial;

- (ii) em Geodesia, onde se efetuam correções da velocidade de propagação da luz na realização de medições com recurso a distanciómetros eletromagnéticos [Casaca (2000)] ou correções dimensionais de coordenadas de alvos obtidas por medição através de teodolito, nível ou taqueómetro [Casaca (2004)].

No caso específico em estudo – propagação atmosférica da luz entre os alvos ativos e o sensor numa distância compreendida entre 100 m e 1000 m – é expectável que as medições dimensionais sejam influenciadas pela refração, em virtude da não-homogeneidade espacial e temporal do meio (ar atmosférico) provocado pela variabilidade das condições ambientais, destacando-se a temperatura do ar na direção vertical³². Este efeito origina um gradiente vertical não-nulo do índice de refração que justifica a trajectória não-retilínea da luz, representada na Figura 3.40.

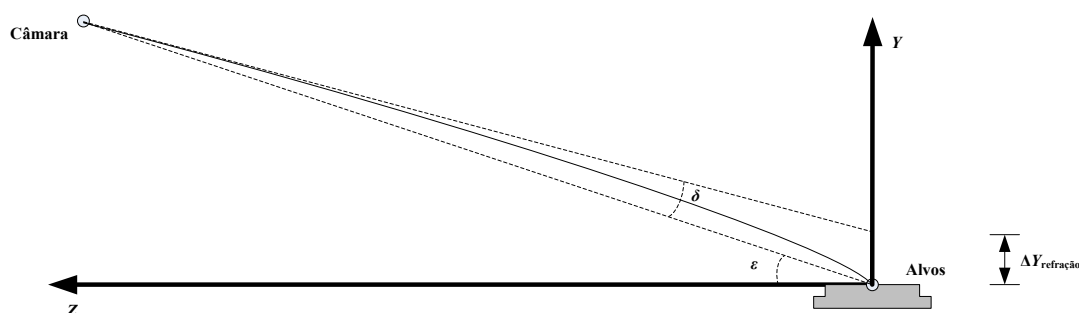


Figura 3.40: Refração vertical em cenário de observação a longa distância com gradiente térmico positivo.

Este efeito faz com que a posição vertical do alvo observada na câmara corresponde a uma posição virtual ou aparente, diferente da posição real, mediante um ângulo δ designado por ângulo de refração vertical. Produz-se, assim, um desvio sistemático da posição vertical dos alvos utilizados na medição de deslocamentos da infraestrutura observada. Note-se que, em caso de gradiente térmico positivo –

³² Para além de distâncias de observação elevadas, o contexto geral da observação dimensional de grandes obras implica uma diferença acentuada de cota altimétrica (por vezes, na ordem de grandeza das dezenas de metros) entre a câmara e os alvos, o que se traduz numa variação espacial das condições atmosféricas (temperatura, humidade e pressão atmosférica) mais significativa na direção vertical, comparativamente com a direção transversal de propagação da luz. De qualquer forma, a análise de ambos os casos – refração vertical ou lateral – é suportada numa formulação teórica idêntica.

aumento da temperatura com aumento da altura em relação ao solo – o desvio vertical por efeito de refração será igualmente positivo (deslocamento vertical virtual dos alvos no sentido positivo de Y) e reciprocamente, no caso de gradiente térmico negativo.

Um aspeto que importa realçar, no contexto da utilização de câmara, refere-se à sua resolução angular instrumental (*vide* Figura 3.10 relativa aos valores típicos em câmaras comuns). De facto, para que o sistema de medição seja sensível ao fenómeno da refração atmosférica, é necessário que a magnitude do ângulo de refração seja superior à resolução angular instrumental da câmara, caso contrário o sistema terá um comportamento “cego” relativamente ao deslocamento virtual dos alvos.

A necessidade de aplicação de correções associadas ao efeito sistemático da refração vertical nas coordenadas mundo dos alvos deverá ser avaliada tendo em consideração os perfis verticais termohigrométricos nas regiões de instalação de câmara e dos alvos do sistema e a evolução vertical correspondente do índice de refração. No caso da observação contínua, estes modelos apresentam um carácter dinâmico associado à variação temporal das condições ambientais no cenário de observação a curto prazo (variação sazonal diária) e a longo prazo (variação sazonal anual).

A aplicação do Princípio de Fermat [Torge (2001)] ao problema da observação dimensional terrestre de infraestruturas permite afirmar que a trajetória t da luz entre um alvo e a câmara corresponde à trajetória que minimiza o tempo de propagação da luz, Δt , expresso por

$$\Delta t = \frac{1}{c} \int_t n(s) ds, \quad (3.50)$$

onde ds é o deslocamento infinitesimal da luz na sua trajetória, n corresponde ao índice de refração que varia ao longo da trajetória da luz s , e c é a velocidade da luz no vácuo. Este problema variacional pode ser expresso por

$$\delta \int_t n(s) ds = 0, \quad (3.51)$$

tendo como solução (de forma similar às equações de Euler-Lagrange na Mecânica Clássica)

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{d\vec{r}}{ds} \right) = \nabla n, \quad (3.52)$$

onde \vec{r} é a representação paramétrica da trajetória da luz e ∇n é o gradiente do índice de refração. A equação diferencial (3.52) possui uma solução analítica [Qiao (1984)] para um gradiente de índice de refração constante entre a câmara e os alvos

$$n(Y) = n_0 + \alpha \cdot Y, \quad (3.53)$$

onde α é a magnitude do gradiente vertical do índice de refração e n_0 é o índice de refração junto à fonte emissora de luz (o alvo ativo na abordagem estudada) posicionada em Y_0 . Caso esta hipótese seja válida, a trajetória não-retilínea da luz é descrita por

$$Z = \frac{n_0 \cos(\varepsilon)}{\alpha} \ln \left(2 \cdot c \cdot Y + b + 2 \cdot \alpha \sqrt{A + b \cdot Y + c \cdot Y^2} \right) \Bigg|_{Y_0}^Y, \quad (3.54)$$

onde ε é o ângulo de elevação da trajetória ideal da luz relativamente ao eixo Z (*vide* Figura 3.40) e $A = n_0^2 \cdot \sin^2(\varepsilon)$, $b = 2 \cdot \alpha \cdot n_0$ e $c = \alpha^2$. Com base na expressão anterior, o ângulo de elevação da trajetória aparente da luz, ε' , pode ser obtido por

$$\varepsilon' = \arctg \left(\frac{dY}{dZ} \Big|_0 \right), \quad (3.55)$$

utilizando um método numérico para o cálculo da derivada na região inicial da trajetória da luz junto à fonte emissora. Deste modo, o ângulo de refração vertical, δ , é igual a

$$\delta = \varepsilon - \varepsilon'. \quad (3.56)$$

Quando os efeitos de não-linearidade relacionados com o gradiente térmico vertical são considerados relevantes, uma abordagem alternativa geodésica [Casaca (2004)] pode ser utilizada na contabilização destes efeitos no ângulo de refração vertical.

Novamente, o ângulo de refração vertical pode ser obtido da equação diferencial 3.52 associada à trajetória da luz com base na decomposição e no relacionamento das componentes tangencial e normal principal. Assumindo um meio isotrópico na direção transversal e tendo em conta a reduzida magnitude do ângulo de

refração vertical, a curvatura³³ da trajetória da luz, k , pode ser relacionada com o gradiente vertical do índice de refração através de

$$k = -\frac{\cos(\varepsilon)}{n} \cdot \frac{dn}{dY}. \quad (3.57)$$

A relação entre o ângulo de refração vertical junto aos alvos e a curvatura da trajetória é dada por

$$\delta = \frac{1}{S} \int_0^S k(S-s)ds, \quad (3.58)$$

onde S é o comprimento da trajetória da luz dos alvos para a câmara, permitindo escrever

$$\delta = -\frac{\cos(\varepsilon)}{S} \int_0^S \frac{1}{n} \frac{dn}{dY} (S-s)ds. \quad (3.59)$$

Esta expressão mostra que o conhecimento do índice de refração e do respetivo gradiente vertical ao longo da trajetória da luz é determinante para a exatidão do ângulo de refração vertical. Nota-se, igualmente, que a sua contribuição é relevante na região inicial da trajetória (na proximidade dos alvos) e tende a decrescer até que se torna nula na região final (próximo da câmara). A quantificação do ângulo de refração vertical através da equação 3.59 implica o uso de integração numérica, por exemplo, a regra de integração de Simpson, obtendo-se

$$\delta = -\frac{S \cdot \cos(\varepsilon)}{6} \left[\left(\frac{1}{n} \right)_i \left(\frac{dn}{dY} \right)_i + 2 \cdot \left(\frac{1}{n} \right)_m \left(\frac{dn}{dY} \right)_m \right], \quad (3.60)$$

onde os índices i e m referem-se, respetivamente, ao cálculo do índice de refração e do gradiente vertical junto ao alvo e a $\frac{1}{2}$ altura entre os alvos e a câmara.

O cálculo do índice de refração do ar húmido é suportado no modelo de refratividade de Ciddor [Ciddor (1996)], válido para radiação visível e no infravermelho próximo, sendo apresentado em detalhe no Anexo 1. No conjunto de grandezas de influência destacam-se, por ordem decrescente de impacto no índice de refração, a temperatura, a humidade relativa, a pressão atmosférica, a quantidade de dióxido de carbono e o comprimento de onda da radiação.

³³ Matematicamente definida por $k = \left\| \frac{d^2 \vec{r}}{ds^2} \right\|$.

Salienta-se que, em regra, estas duas últimas grandezas apenas são contabilizadas em laboratório em situações que requerem um conhecimento muito rigoroso do índice de refração. No contexto de observação de infraestruturas a longa distância, assumem-se valores constantes na quantificação destas grandezas visto que as correspondentes incertezas de medição são desprezáveis quando comparadas com a magnitude de outras componentes de incerteza do índice de refração, nomeadamente, as grandezas de entrada de temperatura, humidade relativa e posicionamento espacial da câmara e dos alvos.

Independentemente da abordagem seguida na determinação do ângulo de refração vertical – gradiente de índice de refração constante ou variável – a correção sistemática das coordenadas mundo dos alvos é determinada com base no referido ângulo por relacionamento trigonométrico associado à disposição geométrica do sistema de medição (câmara e alvos).

3.6.4 Turbulência atmosférica

No estudo do fenómeno da turbulência, a atmosfera é vista como um meio não-homogéneo, de natureza aleatória, compreendido entre a câmara e os alvos, que potencia a degradação de imagem como resultado da variação espacial, temporal e espectral do seu índice de refração. Na prática, a quantificação experimental do coeficiente estrutural do índice de refração (grandeza que exprime a magnitude das flutuações associadas à turbulência) é bastante complexa, dependendo de um extenso conjunto de variáveis como temperatura, humidade, pressão atmosférica, altitude e velocidade do vento. Este facto justificou o desenvolvimento de abordagem simplificada [Casaca (2004)] tendo em vista a identificação de condições estáveis e instáveis de observação por motivo de turbulência atmosférica decorrente da existência de gradientes térmicos acentuados no meio.

Neste modelo simplificado, as camadas de ar próximas do solo são divididas em elementos infinitesimais com altura dY e áreas superior e inferior dA . Cada um destes elementos está sujeito às seguintes forças verticais (*vide* Figura 3.41):

- (i) a força descendente resultante da ação da pressão atmosférica na superfície superior, $(p + dp) \cdot dA$;
- (ii) o peso do elemento de ar, W , na direção descendente;

(iii) a força ascendente da pressão atmosférica na superfície inferior ($p \cdot dA$).

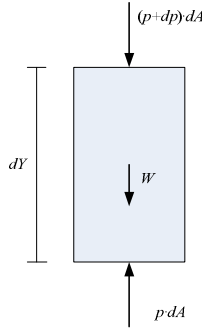


Figura 3.41: Representação das forças verticais que atuam num elemento infinitesimal de ar.

Nesta situação, a condição de equilíbrio é dada por

$$\frac{dp}{dY} = -g \cdot \rho, \quad (3.61)$$

considerando que o peso do elemento de ar corresponde a

$$W = g \cdot \rho \cdot dY \cdot dA, \quad (3.62)$$

onde g é a aceleração gravítica e ρ é a massa volúmica de ar.

Num cenário estável é verificada a condição $dp \geq -g \cdot \rho \cdot dY$, isto é, as forças descendentes (resultantes do peso e da pressão atmosférica na superfície de topo do elemento de ar) igualizam ou prevalecem sobre a força ascendente (originada pela pressão na superfície inferior do elemento de ar). Nesta situação ocorre uma estratificação do ar em camadas com massa volúmica decrescente, não se registando nenhum movimento vertical do elemento de ar.

A condição oposta, $dp < -g \cdot \rho \cdot dY$, provoca um cenário instável onde os elementos de ar nas camadas atmosféricas próximas de uma determinada superfície aquecida por condução, convecção ou radiação, aumentando a sua temperatura e, consequentemente, a sua pressão e volume, originando uma redução da massa volúmica e tornando as forças ascendentes dominantes. Nesta situação, os elementos de ar tendem a mover-se no sentido ascendente, interagindo com os elementos de ar superiores que, por sua vez, tendem a descer sendo aquecidos e, consequentemente, também tendem a subir. Estes movimentos verticais ascendentes de ar quente e descendentes de ar frio são responsáveis, em grande parte, pelo fenómeno de

turbulência atmosférica³⁴, onde as correspondentes alterações temporais e espaciais do índice de refração originam, na perspetiva de um observador, o movimento aleatório do ar atmosférico, constituído por células com diferentes temperaturas e dimensões variáveis.

A condição fronteira entre um cenário estável e instável ocorre quando o gradiente vertical de massa volúmica do ar se torna nulo. Assumindo o ar como um gás perfeito, a equação de estado

$$\rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T}, \quad (3.63)$$

onde M é a massa molar do ar, R é a constante universal dos gases perfeitos e T é a temperatura do ar, permite escrever

$$\frac{dT}{dY} = \frac{T}{p} \cdot \frac{dp}{dY}. \quad (3.64)$$

A substituição da expressão (3.64) na expressão (3.61) permite obter uma expressão para o gradiente térmico vertical que corresponde à condição fronteira entre um cenário estável e instável

$$\frac{dT}{dY} = -\frac{T}{p} \cdot g \cdot \rho, \quad (3.65)$$

notando que, para um cenário estável de observação, a condição $\frac{dT}{dY} \geq -\frac{T}{p} \cdot g \cdot \rho$ é verificada. Como se observa na expressão (3.65), o gradiente térmico vertical depende da massa volúmica do ar. Num cenário de observação caracterizado por uma elevada variabilidade higrométrica temporal e espacial, a grandeza massa volúmica diz respeito ao ar húmido pelo que se torna adequado recorrer à expressão CIPM para o seu cálculo (*vide* Anexo 1).

No caso estudado, o conhecimento de gradientes térmicos verticais na proximidade da câmara e dos alvos pode ser comparado com o valor crítico obtido pela expressão (3.65) de modo a avaliar a estabilidade associada à turbulência atmosférica. A caracterização térmica dos locais de instalação do sistema de medição é

³⁴ Gradientes horizontais de pressão (vento) também podem aumentar ligeiramente a turbulência atmosférica ao contribuírem para a mistura de diferentes camadas quentes e frias de ar.

particularmente relevante para o estudo da influência da refração atmosférica, conforme discutido na secção 3.6.3.

Neste âmbito, é possível recorrer a dois métodos principais para avaliação de gradientes térmicos verticais:

- (i) medições diretas da temperatura do ar a diferentes alturas em relação ao solo e posterior parametrização da evolução vertical da temperatura [Kharaghani (1987)] com recurso a modelos do tipo linear ou não-linear (polinomial, potência, exponencial ou logarítmico);
- (ii) modelos paramétricos meteorológicos³⁵, suportados nos fundamentos teóricos da Física Atmosférica, que toma em conta diversas variáveis, nomeadamente: densidade de fluxo térmico radiante, velocidade do vento, localização geográfica, altitude, estação do ano, hora do dia e cobertura do solo [Webb (1984)].

Uma análise comparativa entre os dois métodos mencionados revela que o método de medição direta da temperatura do ar possui uma concretização simples, requerendo o conhecimento de um número reduzido de variáveis relativamente à abordagem meteorológica, sendo recomendado por este motivo.

3.7 Caracterização metrológica da câmara

3.7.1 Introdução

A caracterização metrológica da câmara abrange, quer a vertente geométrica que suporta o processo de medição dimensional de infraestruturas dinâmicas, quer a vertente radiométrica associada ao sensor de imagem que a compõe. Neste sub-Capítulo, a discussão está centrada apenas em torno da vertente geométrica.

Este facto é justificado porque a componente geométrica é crucial para a concretização bem sucedida da abordagem de medição proposta, constituindo uma matéria de estudo emergente no âmbito de câmaras caracterizadas por uma elevada

³⁵ No conjunto de parâmetros meteorológicos de interesse, destacam-se: (i) a temperatura potencial – temperatura a que uma massa de ar seco teria de ser trazida, de forma adiabática, para uma pressão normal de 1 bar; (ii) a velocidade de fricção – constitui a velocidade de referência associada à velocidade média do vento; (iii) fluxo térmico sensível – determinado com base no balanço energético na superfície terrestre.

distância focal, como as utilizadas neste estudo. Por sua vez, a caracterização radiométrica do sensor de imagem constitui uma matéria de interesse para a qual existe, atualmente, um conhecimento consolidado e recentemente harmonizado a nível internacional [EMVA 1288 (2010)] e que, em regra, é refletido no quadro de especificações técnicas do sensor de imagem. O documento [EMVA 1288 (2010)] apresenta em detalhe as definições das principais características radiométricas, bem como, os meios e métodos de ensaio adotados para a sua quantificação, seja para efeito de confirmação de informação fornecida pelo fabricante, seja para avaliação de eventual degradação num horizonte temporal alargado de utilização do sensor.

Neste estudo, a caracterização geométrica da câmara visa a quantificação de estimativas e incertezas de medição dos parâmetros intrínsecos³⁶: distância focal, coordenadas imagem do ponto principal e coeficientes de distorção da objetiva. O conhecimento adquirido permite avaliar periodicamente a estabilidade geométrica da câmara, sobretudo, em cenário de observação permanente onde se verifica uma exposição temporal prolongada da câmara a um meio ambiental e operacional agressivo. Salienta-se, também, a necessidade de avaliação da contribuição das respetivas incertezas de medição dos parâmetros intrínsecos para a incerteza de medição combinada associada ao deslocamento tridimensional de infraestrutura dinâmica.

No contexto da parametrização intrínseca de câmaras é efetuada uma distinção entre métodos convencionais e métodos emergentes cuja distinção é clarificada em seguida.

Os métodos convencionais estão geralmente associados aos contextos da Fotogrametria e da Visão Computacional, onde se desenvolveram as principais abordagens de parametrização intrínseca de câmaras caracterizadas por uma reduzida distância focal, tipicamente inferior a 100 mm, decorrente do recurso a objetivas do tipo normal e grande angular. Nesse âmbito destacam-se: a Transformação Linear Directa (ou DLT – *Direct Linear Transform*) [Abdel-Aziz (1971)] [Heikkilä (1997)];

³⁶ A abordagem óptica estudada corresponde a uma configuração singular pelo que, neste sub-Capítulo, se excluem os métodos de parametrização intrínseca aplicáveis a configuração múltipla de câmaras (estereoscópica, por exemplo).

e os métodos de Tsai [Tsai (1987)] e de Zhang [Zhang (2000)], cuja descrição simplificada é apresentada na secção 3.7.2.

Os métodos emergentes (*vide* secção 3.7.3), onde se incluem os métodos de ensaio de campo, goniométrico e DOE [Hieronymus (2012)], apresentam um desenvolvimento mais recente motivado pelo crescente recurso a câmaras compostas por objetivas com elevada distância focal – teleobjetivas – e para as quais os métodos convencionais dão uma resposta insatisfatória. A razão desse facto resulta destes suscitarem, frequentemente, a ocorrência de problemas de natureza numérica na quantificação das estimativas de interesse, segundo o modelo geométrico de câmara perspectiva (adotado no presente estudo).

Estes problemas manifestam-se sob a forma de estimativas de parâmetros irrealistas e fisicamente incoerentes decorrentes de instabilidade numérica associada à sobre-parametrização e ao condicionamento deficiente de matrizes cruciais para o processo de cálculo, por via analítica e usando o MMQ [Stamatopoulos (2011)]. Esta situação é agravada pelo requisito de atribuição de valores iniciais às incógnitas no processo de ajustamento de feixes perspectivos, bem como, pelo facto de envolver um campo de visão bastante reduzido (inferior a 10°) e uma projecção quase paralela, de que resulta uma excessiva correlação entre os parâmetros intrínsecos e extrínsecos desconhecidos.

3.7.2 Métodos convencionais de caracterização geométrica de câmaras

3.7.2.1 Transformação Linear Direta

A DLT constitui um método de parametrização bastante comum ao nível da Fotogrametria, promovendo a determinação de parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmara através de relações lineares estabelecidas entre coordenadas conhecidas de pontos de referência no mundo (materializados em pontos fotogramétricos no terreno ou em painéis em formato xadrez) e nas respetivas coordenadas imagem, recorrendo a um conjunto adicional de onze parâmetros (L_i).

Como cada ponto de referência no mundo dá origem a duas equações de colinearidade (a imagem do ponto é bidimensional), é necessário assegurar a visualização de, no mínimo, seis pontos de referência com coordenadas conhecidas no

mundo³⁷. Embora não tenham um significado físico, os parâmetros L_i possuem uma relação explícita com os parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmara. Deste modo, no processo de cálculo associado a este método são identificadas duas etapas sequenciais: a primeira, relacionada com a determinação dos parâmetros L_i e a segunda, envolvendo a determinação de parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmara (*vide* descrição detalhada em [Abdel-Aziz (1971)]).

Em [Heikkilä (1997)] é promovida uma extensão da DLT considerando duas etapas adicionais. A primeira diz respeito à correção da distorção geométrica decorrente do efeito de perspectiva na projecção de superfícies circulares no plano imagem. A segunda consiste na introdução de parâmetros de distorção da objetiva e no recurso a processo iterativo de otimização não-linear, segundo o algoritmo de Levenberg-Marquardt, onde os valores iniciais das incógnitas (parâmetros) correspondem às soluções obtidas da DLT original.

As alterações introduzidas por [Heikkilä (1997)] nas restrições associadas aos onze parâmetros L_i promovem uma melhoria da estabilidade numérica do processo de cálculo notando-se que, apenas nove em onze parâmetros são independentes, sendo importante assegurar que os pontos de referência observados sejam coplanares no mundo.

3.7.2.2 Método de Tsai

No método de parametrização desenvolvido por [Tsai (1987)] recorre-se a um conjunto de pontos de referência coplanares (materializado em painéis bidimensionais ou tridimensionais em formato xadrez), em que o referido plano não é paralelo ao plano imagem (evitando uma dependência linear entre a distância focal e a direção longitudinal), promovendo-se a sua rotação em torno de um eixo vertical. Embora não exista informação sobre a profundidade dos pontos relativamente à câmara, a disposição coplanar segundo diferentes profundidades promove uma melhoria de exatidão do processo. É, também, recomendável que a origem do sistema de coordenadas dos pontos de referência no mundo esteja afastada da origem e do eixo

³⁷ A inclusão de parâmetros intrínsecos de distorção da objetiva no processo de caracterização geométrica da câmara implica um aumento do número de pontos com coordenadas conhecidas no mundo.

vertical da câmara, de modo a evitar coordenadas verticais da posição da câmara nulas.

Este método é suportado num relacionamento geométrico de alinhamento radial entre pontos independente da distorção radial da objetiva (note-se que o método não contabiliza efeitos decorrentes da distorção tangencial) e assumindo um valor constante para as coordenadas imagem do ponto principal, que se considera o centro da imagem. Identificam-se duas etapas principais no processo de cálculo [Tsai (1987)]:

- (i) a primeira etapa consiste na resolução do sistema de equações lineares que inclui a informação de entrada associada às coordenadas mundo e imagem de, no mínimo, cinco pontos de referência (caso se pretenda determinar o fator de escala horizontal, são necessários mais dois pontos adicionais materializados em painel tridimensional); o estabelecimento de restrição de paralelismo e o facto de se considerar uma distorção radial nula nesta fase, permitem determinar a quase totalidade de parâmetros extrínsecos (matriz de rotação e duas componentes do vetor de translação) da câmara no momento de aquisição de imagem, sem recorrer a valores iniciais;
- (ii) a segunda etapa utiliza os resultados obtidos na etapa anterior para determinar, de forma linear, o parâmetro extrínseco em falta (a coordenada do vetor translação) e a distância focal; segue-se um processo de otimização envolvendo todos os parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmara, assumindo os valores obtidos na etapa anterior como valores iniciais, com exceção da distorção radial onde se considera um valor inicial nulo.

Atendendo ao conjunto de aproximações estabelecidas no método de Tsai, designadamente, no que respeita à distorção da objetiva e às coordenadas imagem constantes associadas ao ponto principal da câmara, este método de caracterização geométrica apresenta um nível de exatidão inferior ao mencionado para a Transformação Linear Direta [Santos (2011)].

3.7.2.3 Método de Zhang

No método de Zhang [Zhang (2000)] também se recorre a um conjunto de pontos de referência coplanares, em regra, materializados num painel com formato xadrez, promovendo-se a aquisição de imagem segundo, pelo menos, três orientações distintas da câmara não-paralelas entre si ou ao plano da imagem (se for assumido um fator de ortogonalidade nulo, são apenas necessárias duas imagens).

O processo de cálculo engloba duas etapas sequenciais:

- (i) na primeira etapa, é obtida uma solução analítica para os parâmetros da câmara com base no conhecimento das coordenadas mundo e imagem dos pontos de referência, sendo explorada a ortogonalidade da matriz de rotação na simplificação de um sistema de equações; a fatorização de Choleski permite determinar os parâmetros intrínsecos e uma matriz de transformação homográfica que suportam, por sua vez, a determinação aproximada dos parâmetros extrínsecos para cada posicionamento e orientação da câmara;
- (ii) na segunda etapa, é efetuado o refinamento das soluções obtidas na etapa anterior e são determinados os parâmetros de distorção radial através de processo de otimização não-linear.

Embora seja um método bastante expedito, estudos numéricos e experimentais realizados por [Santos (2011)] demonstraram a sua inaplicabilidade na caracterização geométrica de câmaras com distâncias focal e de observação elevadas (respetivamente, 640 mm e 400 m, no caso estudado).

3.7.3 Métodos emergentes de caracterização geométrica de câmaras

3.7.3.1 Método de ensaio de campo

No método de ensaio de campo descrito em [Stamatopoulos (2011)], é realizado o ajuste de feixes perspetivos com auto-calibração em câmara com elevada distância focal, recorrendo a uma montagem experimental dedicada que visa contrariar a uma tendência do método para a projeção paralela dos feixes ópticos. Para tal, recorre-se a um número elevado de posições de observação (em regra, entre 8 e 20 posições) convergentes em relação a um conjunto numeroso de alvos distribuído por um espaço tridimensional com dimensões lineares na ordem de grandeza do metro. Os ângulos de convergência entre posições consecutivas são também significativos,

assim como a distância de observação entre câmara e alvos (próxima da ordem de grandeza da centena de metros), conforme se mostra na representação esquemática do método na Figura 3.42 [Stamatopoulos (2011)].

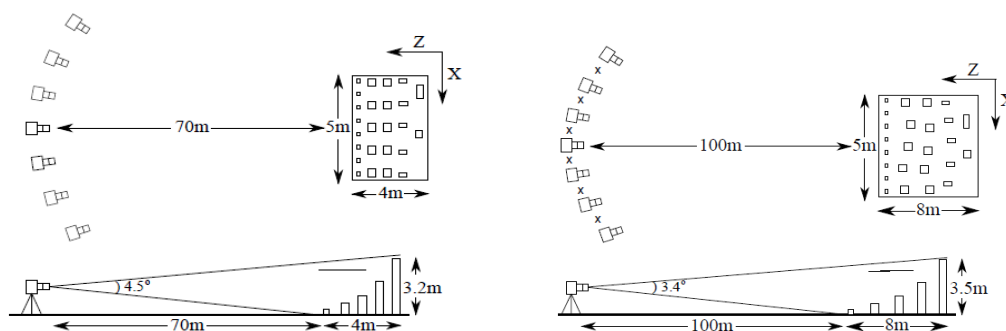


Figura 3.42: Exemplos de configurações geométricas adotadas no âmbito do método de ensaio de campo.

A informação de entrada do processo de cálculo dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmara é composta pelas coordenadas imagem dos alvos, extraídas por processamento digital das imagens obtidas nas diferentes posições de observação, e pelas respectivas coordenadas mundo dos alvos determinadas, por exemplo, através de observação geodésica prévia. Salienta-se que, no âmbito do processo de cálculo, [Stamatopoulos (2011)] menciona a ausência de problemas de instabilidade numérica na obtenção de soluções por via direta ou por estabelecimento de equações normais, com utilização de método ortogonal de decomposição SVD. No Quadro 3.12 é apresentado um resumo dos elementos e resultados experimentais obtidos por aplicação do método de ensaio de campo [Stamatopoulos (2011)].

A análise do Quadro 3.12 revela que a caracterização geométrica de câmaras com elevada distância focal pelo método de ensaio de campo apresenta, na ausência de problemas de instabilidade numérica, reduzidas incertezas de medição ao nível dos parâmetros intrínsecos. As dimensões globais da montagem experimental exigida para este tipo de ensaio geométrico implica o desenvolvimento de instalações dedicadas, preferencialmente, em ambiente interior de modo a reduzir a influência de fatores ambientais nos resultados obtidos.

Quadro 3.12: Elementos e resultados experimentais do método de ensaio de campo.

Distância focal nominal	300 mm	400 mm
Ângulo de abertura do campo de visão	4,5°	3,4°
Número de posições de observação	7	
Distância entre posições de observação	12 m	7 m
Número de imagens por posição de observação	3 (rotações de 0°, 90° e -90° em torno do eixo óptico)	
Número total de imagens	21	
Distância de observação	70 m	100 m
Número de alvos	113	119
Dimensões globais do conjunto de alvos	Largura: 5 m Profundidade: 4 m Altura: 3,2 m	Largura: 5 m Profundidade: 8 m Altura: 3,5 m
Desvio padrão da distância focal	0,15 mm	0,08 mm
Desvio padrão das coordenadas do ponto principal	0,01 mm	0,01 mm
Desvio padrão das coordenadas de pontos no mundo	0,12 mm	0,32 mm
Valor quadrático médio dos resíduos das coordenadas imagem dos alvos	0,14 pixel	0,21 pixel

3.7.3.2 Método goniométrico

No método goniométrico é promovida a iluminação singular dos píxeis que compõem o sensor de imagem da câmara, recorrendo a instalação laboratorial dedicada que inclui como principais equipamentos de ensaio (*vide* Figura 3.43) [Sandau (2010)], [Hieronymus (2012)]:

- (i) colimador – elemento responsável pela produção de feixe de raios paralelos, simulando uma fonte pontual de luz no infinito;
- (ii) mesa de rotação com goniómetro de elevada exatidão – permite a montagem da câmara numa configuração geométrica bem conhecida e a medição de dois ângulos de orientação da câmara relativamente ao colimador;

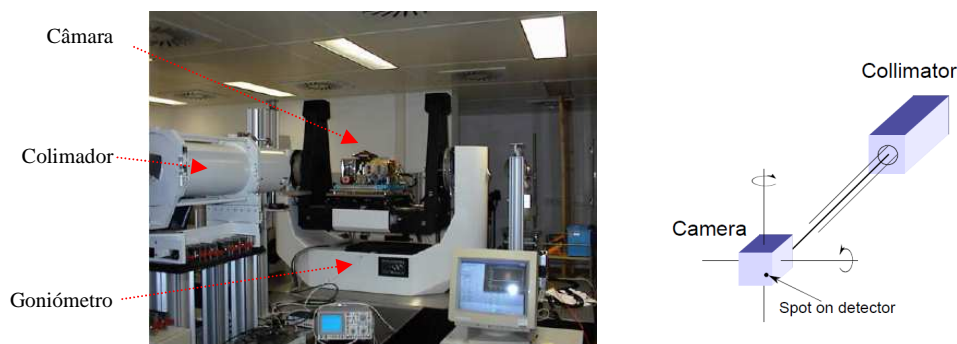


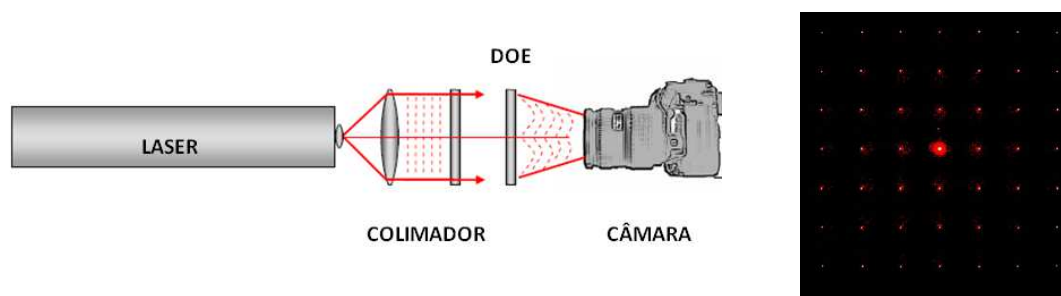
Figura 3.43: Montagem experimental no método goniométrico e respetiva representação esquemática.

Esta montagem assegura a formação de um ponto luminoso no plano focal da câmara permitindo iluminar, de forma singular, cada píxel do sensor de imagem e

conhecer os respectivos ângulos de orientação da câmara (parâmetros extrínsecos) relativamente à direção de emissão do colimador. Trata-se, portanto, de um ensaio bastante longo sendo por este motivo particularmente adequado à caracterização de áreas parciais do sensor de imagem com dimensão reduzida e englobando, também, um número reduzido de píxeis [Krüger (2005)]. Salienta-se que os recursos experimentais mencionados anteriormente são caracterizados por níveis de complexidade e custo económico bastante elevados.

3.7.3.3 Método DOE

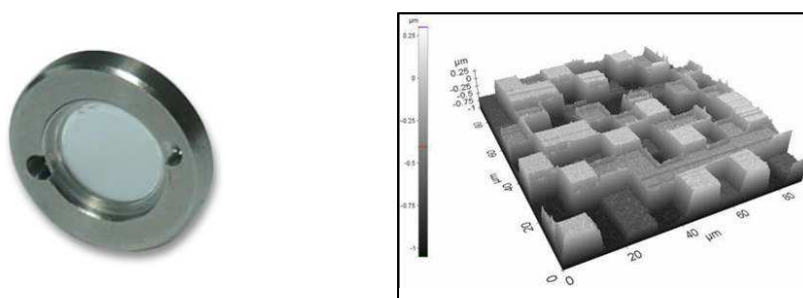
Este método de caracterização geométrica de câmaras recorre a um feixe laser colimado, promovendo a sua incidência numa rede óptica difrativa (constitui um elemento óptico difrativo ou DOE), originando uma distribuição espacial de pontos conhecida – padrão de difração – no plano focal da câmara [Bauer (2008)], conforme ilustrado nas Figuras 3.44 e 3.45.



Figuras 3.44 e 3.45: Representação do método DOE (à esq.) e padrão de difração (à dir.).

Contrariamente ao que acontece nos outros métodos de caracterização mencionados anteriormente (ensaio de campo e método goniométrico), o método DOE necessita apenas de uma imagem do conjunto de pontos de difração para determinar os parâmetros geométricos de interesse da câmara, visto que a imagem obtida reúne, em simultâneo, diferentes orientações do feixe incidente. Note-se que este feixe laser deve apresentar um comprimento de onda, em regra, na região vermelha (633 nm) ou verde (514 nm) do espectro visível, compatível com a banda espectral na qual o sensor de imagem da câmara é sensível. A concretização experimental deste método em ambiente laboratorial controlado (temperatura, humidade e vibrações) contribui significativamente para a melhoria da incerteza de medição da parametrização pretendida, não requerendo instalações laboratoriais complexas e dedicadas sendo, por este motivo, considerado mais adequado quando comparado com os restantes métodos emergentes.

A rede de difração corresponde a uma superfície em vidro ou em material polimérico que apresenta uma microestrutura complexa constituída por dois ou mais níveis de profundidade (*vide* Figuras 3.46 e 3.47) [Holoeye (2012)], sendo produzido através de técnicas litográficas e decapagem com recurso a feixe de eletrões ou laser. Este tipo de processo produtivo permite obter tolerâncias de fabrico bastante reduzidas, compreendidas entre 5 nm e 50 nm, as quais são inferiores ou iguais às tolerâncias de produção de padrões dimensionais de elevada exatidão como é o caso dos blocos-padrão [Schwenke (2000)].



Figuras 3.46 e 3.47: Rede de difração (à esq.) e imagem da sua superfície obtida por microscopia atômica (à dir.).

Atualmente, as redes de difração constituem elementos ópticos de utilização comum³⁸ (do tipo *off-the-shelf*), apresentando uma elevada variabilidade de padrões de difração – cruz, círculos singulares e concêntricos, linhas múltiplas, entre outros (*vide* Figura 3.48) [Holoeye (2012)] – tendo particular interesse, para a caracterização geométrica da câmara, o padrão correspondente a matriz regular de pontos onde é válida a seguinte relação geométrica

$$g \cdot \sin(\theta_n) = n \cdot \lambda, \quad (3.66)$$

em que g corresponde ao período espacial da rede, θ_n é o ângulo de difração do feixe de ordem n , e λ é o comprimento de onda do laser. Salienta-se que, no padrão de difração, o ponto de ordem central ($n = 0$) apresenta uma dimensão e intensidade luminosa ligeiramente superior à dos restantes pontos de difração, dependente do comprimento de onda do feixe laser. Refira-se também que, na prática, os pontos de difração apresentam um perfil de intensidade não-uniforme do tipo gaussiano.

³⁸ Existem, igualmente, redes de difração do tipo *custom-made* cujo custo económico é, em regra, extremamente elevado.

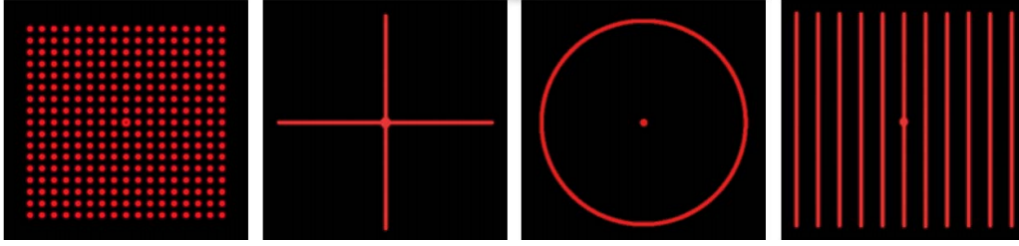


Figura 3.48: Padrões típicos de difração associados a redes ópticas difrativas.

No ensaio de caracterização geométrica da câmara, a seleção de uma rede de difração para produção de matriz regular de pontos deve ter em conta os seguintes elementos [Bauer (2008)]: (i) o período espacial da rede, preferencialmente igual nas direções horizontal e vertical; (ii) o diâmetro da rede, procurando que seja próximo dos diâmetros associados ao feixe laser colimado e à abertura da câmara; (iii) a ordem máxima de difração da rede e o correspondente ângulo máximo de abertura, que deverá ser superior ao ângulo associado ao campo de visão da câmara; (iv) o espaçamento angular entre feixes difratados e o número de pontos de difração.

Cada ponto de difração projetado no plano focal da câmara representa uma direção cujas coordenadas homogêneas, $\mathbf{d} = [X, Y, Z, 0]^T$, correspondem a

$$\mathbf{d} = \left[\lambda \cdot f_x, \quad \lambda \cdot f_y, \quad \left[1 - \lambda^2 (f_x^2 + f_y^2) \right]^{0.5}, \quad 0 \right]^T, \quad (3.67)$$

onde $\mathbf{f} = [f_x, f_y]$ é a frequência espacial associada à rede de difração utilizada, notando que

$$f_{x,y} = \frac{n_{x,y}}{g_{x,y}}, \quad (3.68)$$

em que (n_x, n_y) correspondem às ordens de difração nas direções x e y da rede de difração e (g_x, g_y) são constantes associadas ao período espacial da rede.

Numa montagem laboratorial real, é expetável existir um desalinhamento angular entre o feixe laser colimado e a normal à rede de difração, traduzido por

$$\mathbf{r} = [\sin(\beta) \quad -\sin(\alpha) \cdot \cos(\beta) \quad \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta)]^T, \quad (3.69)$$

em que α e β correspondem aos ângulos de rotação (de Euler) entre os eixos horizontal e vertical dos sistemas de coordenadas do feixe laser colimado e da rede de difração. Deste modo, as direções dos feixes difratados passam a ser expressas por

$$\mathbf{d} = \left[\lambda \cdot f_x + r_x, \quad \lambda \cdot f_y + r_y, \quad \left[1 - (\lambda \cdot f_x + r_x)^2 - (\lambda \cdot f_y + r_y)^2 \right]^{0.5}, \quad 0 \right]^T. \quad (3.70)$$

A sua expressão no sistema de coordenadas associado à câmara implica a seguinte transformação

$$\mathbf{d}' = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{d}, \quad (3.71)$$

onde \mathbf{R} é a matriz de rotação que define a orientação da câmara e \mathbf{t} é o vetor translação associado à posição espacial da câmara notando que, na expressão anterior, o mapeamento de pontos ideais no infinito é invariante em relação à translação [Bauer (2008)], pelo que o número de parâmetros extrínsecos desconhecidos se torna mais reduzido (apenas três ângulos de Euler ou as respetivas quatro componentes do quaternião unitário da rotação).

O conhecimento das direções dos feixes difratados permite que se recorra ao modelo geométrico de câmara perspetiva (secção 3.5.2) para expressão das coordenadas imagem ideais dos pontos de difração no plano focal da câmara, notando que a origem do sistema de coordenadas da câmara é coincidente com o centro de projeção. A determinação das coordenadas imagem dos pontos de difração permite estabelecer um processo de otimização (analítico ou numérico), visando a minimização da distância entre pontos ideais e reais, do qual se extraem as soluções para os parâmetros intrínsecos e extrínsecos desconhecidos da câmara.

O nível de exatidão das estimativas obtidas depende, por um lado, da incerteza de medição associada ao valor constante de período espacial da rede de difração e, por outro lado, da incerteza de medição das coordenadas imagem medidas nos pontos de difração, cuja magnitude depende da proximidade estabelecida pela montagem experimental em relação à situação ideal de incidência de onda plana com distribuição de intensidade uniforme, perpendicular à superfície da rede. No que se refere ao comprimento de onda do laser utilizado (com rastreabilidade a padrão primário do SI), a correspondente incerteza de medição é desprezável comparativamente com as restantes componentes de incerteza mencionadas anteriormente.

3.8 Caraterização do referencial de medição

3.8.1 Nota introdutória

A caraterização metrológica do referencial de medição com alvos ativos abrange, quer a vertente dimensional e geométrica com impacto significativo na abordagem de medição proposta, quer a vertente radiométrica associada aos LEDs que constituem fontes emissoras do sistema de medição óptica. Neste sub-Capítulo, a discussão encontra-se centrada apenas em torno da vertente dimensional e geométrica.

Esta situação é justificada pelo facto da componente dimensional e geométrica ser crítica para a concretização bem sucedida da abordagem de medição proposta, constituindo o referencial de medição em relação ao qual serão efetuadas as medições de deslocamento tridimensional da infraestrutura observada. Por sua vez, a caraterização radiométrica dos LEDs, embora seja uma matéria de interesse, verifica-se que já existe um conhecimento consolidado e recentemente harmonizado a nível internacional [CIE 127 (2007)] que, em regra, é refletido no quadro de especificações técnicas dos LEDs. O guia [CIE 127 (2007)] apresenta as definições das principais caraterísticas radiométricas dos LEDs bem como os meios e métodos de ensaio adotados para a sua quantificação, seja para efeito de confirmação de informação declarada pelo fabricante, seja para permitir a avaliação da degradação num horizonte temporal alargado de utilização dos LEDs nos alvos ativos do sistema de medição.

3.8.2 Caraterização dimensional e geométrica

No contexto da abordagem óptica desenvolvida, o conjunto de quatro alvos ativos desempenha um papel principal na concretização e exatidão do método aplicado ao constituir o referencial de medição em relação ao qual é efetuada a medição do deslocamento tridimensional da infraestrutura observada. Neste âmbito, a caraterização dimensional e geométrica deste componente do sistema de medição permite avaliar a sua adequação enquanto referencial de medição, onde se exige um conhecimento rigoroso dos seguintes aspetos:

- (i) as coordenadas tridimensionais relativas entre os quatros alvos;
- (ii) a ortogonalidade entre os eixos do referencial, associados às direções principais de deslocamento da infraestrutura;

- (iii) a inclinação vertical dos alvos, quando aplicável, para melhoria do direcionamento dos feixes luminosos dos alvos em relação ao sensor de imagem da câmara;
- (iv) a forma geométrica individual de cada alvo.

A avaliação destas características deve ser efetuada imediatamente antes da entrada ao serviço do referencial mas, também, de forma periódica, de modo a permitir detetar a eventual degradação dimensional e geométrica decorrente da exposição prolongada do referencial a um meio ambiental e operacional agressivo.

Conforme referido na secção 3.2.4.4, o recurso a LEDs com encapsulamento semiesférico constitui uma solução atrativa para a definição de alvos ativos no âmbito da abordagem óptica desenvolvida. Neste sentido, é necessário dispor de um método e do respetivo equipamento de referência com nível de exatidão adequado à realização de medições de interesse nos LEDs que asseguram o referencial de medição. O método de medição de coordenadas tridimensionais por contacto é particularmente adequado à caracterização dimensional e geométrica pretendida, sendo suportado, no caso em estudo, por uma máquina de medição de coordenadas tridimensionais (MMC 3D) por contacto, contando com um suporte computacional que permite o desenvolvimento matemático de elementos geométricos (linhas, planos, circunferências, esferas, cilindros, cones, entre outros) que permitem estabelecer, no software, a replicação do objeto que se pretende caracterizar.

No caso específico dos LEDs com encapsulamento semiesférico, este aspeto é particularmente relevante visto, que se pretende caracterizar, com rigor, a superfície esférica existente no topo deste tipo de LED e determinar o respetivo centro geométrico, o qual se considera representativo da posição tridimensional do LED no espaço. Por sua vez, em caso de alvo ativo formado por múltiplos LEDs, o seu centro geométrico (representativo da sua posição tridimensional no espaço) pode também ser determinado computacionalmente mediante recurso às coordenadas dos centros geométricos associados aos LEDs medidos e desenvolvimento matemático de formas geométricas de interesse.

Na Figura 3.49 é apresentada uma MMC 3D por contacto³⁹, onde é visível a capacidade de movimentação do seu sistema de apalpação e medição de coordenadas espaciais na superfície de um objeto de interesse colocado na mesa plano. Por sua vez, a Figura 3.50 mostra a operação de qualificação do sistema de apalpação, com recurso a uma esfera padrão rastreada ao SI e com diâmetro convencional conhecido, visando a determinação do raio efetivo da ponteira utilizada no processo de medição.



Figuras 3.49 e 3.50: Sistema de apalpação de MMC 3D (à esq.) e qualificação da ponteira (à dir.).

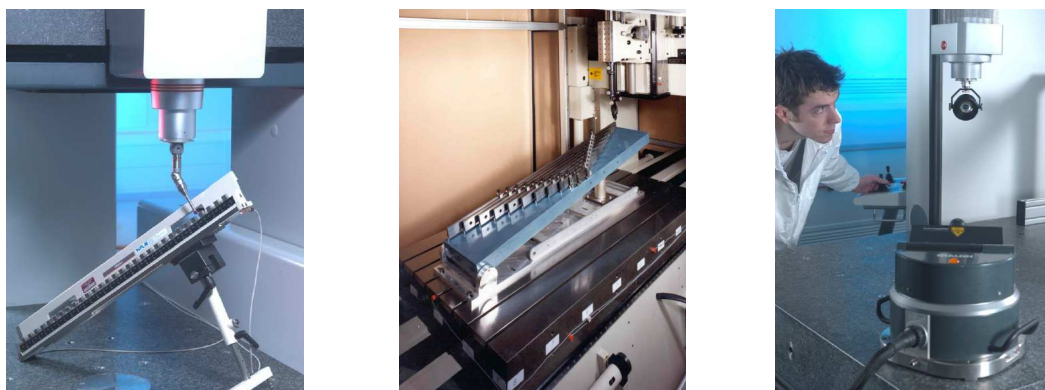
No atual enquadramento normativo internacional, a avaliação metrológica de MMC 3D é definida pelo conjunto de normas ISO 10360, que suportam o estabelecimento da sua rastreabilidade dimensional ao SI e garantem a obtenção de incertezas de medição, tipicamente, na ordem de grandeza do micrometro numa dimensão linear que pode atingir um metro. No conjunto de fontes de incerteza espaciais e computacionais associadas à medição com recurso a MMC 3D, destacam-se [Flack (2011)]:

- (i) a exatidão dimensional dos seus componentes principais, nomeadamente, guias, escalas, sistema de apalpação e esfera de qualificação;
- (ii) as condições ambientais (temperatura, humidade e vibração) do meio laboratorial onde se localiza a MMC 3D;
- (iii) o procedimento de apalpação adoptado, em particular, a magnitude e direção da força de apalpação, o tipo de ponteira e a velocidade de medição;
- (iv) o objeto medido, designadamente, as suas propriedades mecânicas de massa, dureza, rugosidade e elasticidade;
- (v) a aplicação e o sistema computacionais utilizados na estimação de elementos geométricos associados ao objeto medido;

³⁹ Algumas MMC 3D mais recentes incluem, de forma complementar, sistemas ópticos de visão computacional.

- (vi) o número e a posição relativa dos pontos medidos na superfície de interesse no objeto;
- (vii) o desvio obtido em relação à forma geométrica ideal do elemento no objeto.

Salienta-se que, a calibração inicial da MMC 3D suporta a aplicação de correções que visam a minimização de desvios geométricos de linearidade, retilismo e de desvios angulares associados a defeitos de produção e a desalinhamentos de montagem. A rastreabilidade dimensional da MMC 3D ao SI é estabelecida periodicamente recorrendo a padrões de referência onde se incluem medidas materializadas (padrões escalonados, blocos e barras padrão) e interferómetros laser (*vide* Figuras 3.51 a 3.53) [Flack (2011)].



Figuras 3.51 a 3.53: Calibração de MMC 3D com recurso a: padrão escalonado (à esq.), blocos padrão (ao meio) e interferómetro laser (à dir).

Neste tipo de equipamento de referência é também usual a realização de verificações intermédias recorrendo a medidas materializadas⁴⁰.

O processo global de caracterização dimensional e geométrica de um objeto com uma MMC 3D engloba geralmente os seguintes passos [Flack (2011)]:

- (i) seleção dos elementos de interesse no objeto – no caso em estudo, corresponde à semiesfera localizada no topo de cada LED;
- (ii) definição do referencial de medição – como se pretendem obter as coordenadas relativas entre alvos (escolhendo um dos alvos como origem do referencial de medição), a escolha de referencial de medição na MMC 3D não constitui, neste caso, um aspeto relevante;

⁴⁰ Barra, placa com esferas padrão ou outro tipo de artefato rastreado que inclua formas geométricas de interesse, orifícios ou saliências circulares, elípticas, entre outras.

- (iii) seleção da orientação do objeto – deve ter conta as dimensões da mesa plano da MMC 3D e as respectivas gamas de medição, procurando alinhar as direções principais do objeto com os eixos de medição;
- (iv) fixação do objeto à mesa plano – é recomendável o estabelecimento de uma fixação mecânica rígida, evitando a introdução de deformações elásticas significativas no objeto sujeito a medição e a utilização de materiais com coeficientes de dilatação linear distintos;
- (v) qualificação do sistema de apalpação – deve ser efetuada para cada tipo de ponteira (incluindo extensões) e posição de medição⁴¹, no início do processo de medição do objeto;
- (vi) definição da sequência de pontos de medição – nesta etapa é estabelecida a distribuição espacial equilibrada dos pontos de medição pelo objeto destacando-se, pelo seu impacto no desvio obtido em relação à forma geométrica ideal, o número de pontos atribuídos a cada elemento geométrico contido no objeto; conforme se menciona no Quadro 3.13 [Flack (2011)], o número de pontos medidos por elemento geométrico deverá ser superior ao valor mínimo matematicamente exigido;

Quadro 3.13: Número de pontos de medição por elemento geométrico em MMC 3D.

Elemento geométrico	N.º de pontos exigidos para cálculo matemático	N.º de pontos recomendado	Configuração geométrica de medição recomendada
Linha	2	5	
Plano	3	9	Três linhas com três pontos cada
Círculo	3	7	
Esfera	4	9	Três círculos de três pontos em três planos paralelos
Cone	6	12	Círculos em quatro planos paralelos (para avaliação de retilismo)
		15	Cinco pontos por círculo (para avaliação de circularidade)
Elipse	4	12	
Cilindro	5	12	Círculos em quatro planos paralelos (para avaliação de retilismo)
		15	Cinco pontos por círculo (para avaliação de circularidade)
Cubo	6	18	Três ponto por face

- (vii) programação da MMC 3D – etapa que pode incluir a definição de trajetória automatizada do sistema de apalpação, do número de pontos de medição e a seleção do algoritmo de cálculo aplicável a uma dada forma geométrica.

⁴¹ Na maioria dos sistemas de apalpação de MMC 3D, a posição da ponteira é definida por rotação segundo dois eixos distintos.

3.9 Método de calibração dimensional

3.9.1 Introdução

A integração do sistema de medição dimensional numa cadeia de rastreabilidade ao SI permite estabelecer uma base comparativa essencial para a avaliação da exatidão associada à abordagem óptica proposta – configuração singular de câmara móvel – relativamente a soluções alternativas adotadas para o problema da medição dimensional em infraestruturas dinâmicas de natureza similar (como é o caso de abordagens ópticas de configuração múltipla ou singular de câmara fixa) ou de outra natureza (por exemplo, em relação às abordagens suportadas em sistemas GNSS ou sistemas do tipo radar interferométrico com micro-ondas).

Tendo por objetivo melhorar a compreensão das secções seguintes 3.9.2 e 3.9.3 relacionadas com o estabelecimento de rastreabilidade dimensional ao SI, esta secção apresenta a definição de calibração adotada nesse âmbito, conforme exposto no [VIM (2012)]. Pretende-se, deste modo, clarificar o seu significado neste estudo tendo em conta que a presente tese estabelece a ligação entre dois domínios científicos distintos – a Óptica e a Engenharia Civil – nos quais o referido conceito pode ser interpretado de forma distinta.

De acordo com o [VIM (2012)], a calibração é definida como a *operação que, em condições especificadas, num primeiro passo, estabelece a relação entre os valores da grandeza com incertezas de medição provenientes de padrões e as indicações correspondentes com incertezas de medição associadas e, num segundo passo, usa esta informação para estabelecer uma relação para obter o resultado de uma indicação*. Esta operação metrológica permite avaliar a exatidão da indicação, ou seja, a proximidade entre os valores medidos e os valores verdadeiros de uma mensuranda notando que, na prática, o valor verdadeiro da grandeza não é determinável recorrendo-se a um valor convencional da grandeza que, na calibração, corresponde ao valor de referência. A diferença entre os valores medidos e os valores de referência é quantificada pelo desvio de calibração que corresponde à diferença algébrica entre as melhores estimativas de indicação do equipamento a calibrar e do padrão de referência.

No caso particular estudado, a existência de um suporte metrológico de calibração dimensional do sistema de medição é determinante para a confiança no seu

desempenho tendo em conta a elevada agressividade ambiental e operacional do meio onde se encontra instalado, bem como, relevante no contexto do desenvolvimento e validação de sistemas de compensação do efeito sistemático da refração vertical, o qual poderá afetar a exatidão das coordenadas mundo dos alvos de forma significativa.

3.9.2 Descrição do método de ensaio

O principal desafio associado à calibração do sistema óptico proposto está relacionado com o facto de se tratar de um sistema de medição dimensional a longa distância (entre 100 m e 1000 m), pelo que uma calibração convencional em laboratório não é exequível, sendo necessário considerar a realização do ensaio de calibração em campo (*in situ*).

Para esse efeito dever-se-á assegurar o estabelecimento de uma linha de visão entre a câmara e o referencial de medição numa configuração geométrica o mais próxima possível da que se verifica na situação de medição dimensional, no que se refere à distância de observação e direção de propagação óptica dos feixes luminosos. Com efeito, estas duas variáveis têm um significativo impacto no desempenho do sistema de medição, nomeadamente, devido à influência de fenómenos como a refração e a turbulência atmosféricas. Para além deste condicionalismo, é igualmente necessário assegurar que ambos os elementos do sistema de medição – câmara e alvos – estejam posicionados em regiões estáticas do cenário de observação. No contexto das infraestruturas dinâmicas, esta condição é cumprida mediante o posicionamento em regiões de fundações, ancoragens, margens fluviais ou encostas. Quando a câmara e o referencial se encontram em regiões estáticas, é possível simular o deslocamento da câmara pela movimentação do referencial entre posições de referência, conforme ilustrado na Figura 3.54.

A aquisição das respetivas imagens do referencial nas posições de referência, em conjunto com o conhecimento prévio dos parâmetros intrínsecos da câmara e das coordenadas mundo dos alvos, permite dispor dos elementos necessários à determinação do valor de deslocamento lido no sistema de medição por aplicação do algoritmo de cálculo da posição do centro de projecção da câmara segundo as equações de colinearidade.

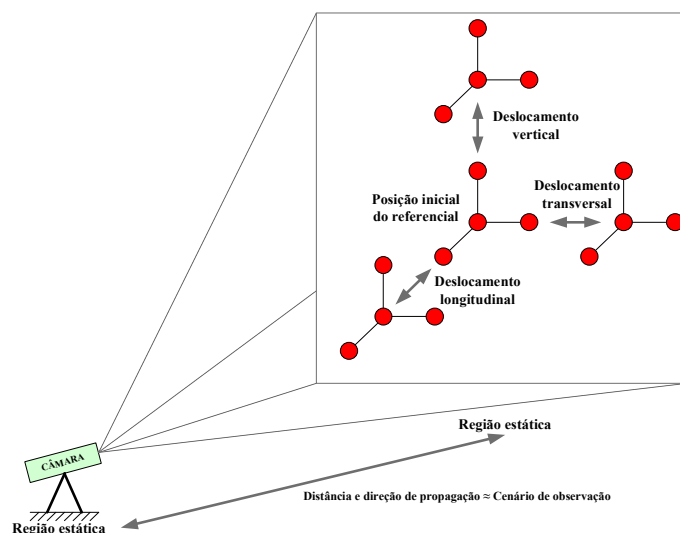


Figura 3.54: Representação do ensaio de calibração dimensional do sistema de medição.

A estimativa de deslocamento lido pode, assim, ser comparada com o deslocamento obtido pela diferença entre posições de referência do referencial, conforme ilustrado na Figura 3.55, recorrendo a um dispositivo de transferência que possua posições de referência solidárias com o referencial de medição.

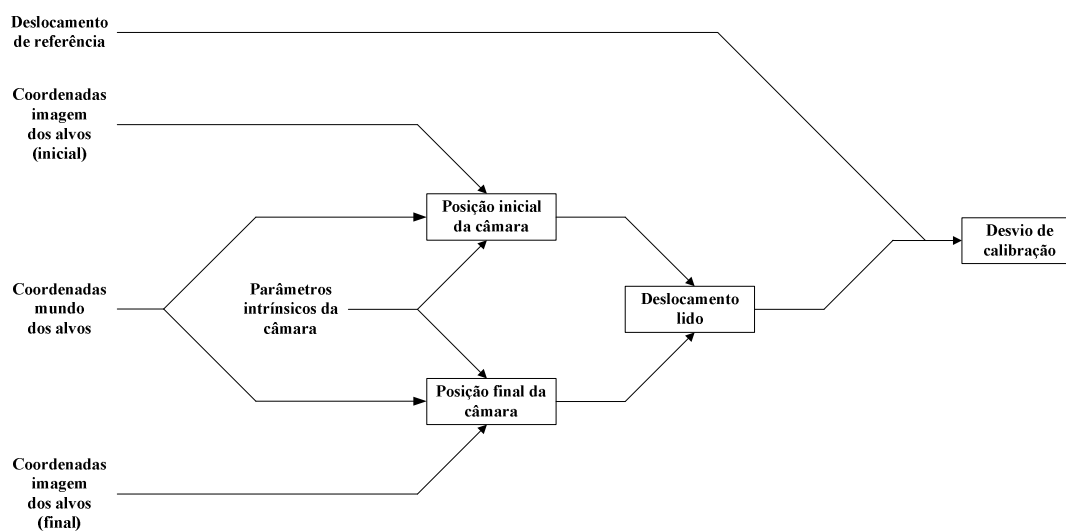


Figura 3.55: Diagrama funcional do processo de calibração.

Visto que o sistema a calibrar visa a medição dinâmica de deslocamento em infraestruturas, considera-se adequado realizar a calibração em regime dinâmico, instalando o referencial num atuador elétrico linear, com cadeias de medição dimensional e temporal rastreadas ao SI, que permita aplicar deslocamentos com diferentes amplitudes e frequências dinâmicas (de preferência, próximas das

observadas em regime operacional) ao mesmo tempo que se adquiriam sequências de imagens através da câmara posicionada em região estática. Contudo, este tipo de operação apresenta limitações de custo económico e complexidade ao nível da comunicação de sinal de sincronismo entre a câmara e o atuador a longa distância (via comunicação sem fios ou suportada em rede eléctrica ou de fibra óptica).

Este facto justifica a realização alternativa de calibração em regime estático mediante utilização de dispositivo de transferência com posições de referência para montagem do referencial. A determinação das posições de referência deverá ocorrer antes e depois da realização do ensaio de campo para avaliar a eventual degradação da integridade espacial do dispositivo de transferência devendo também ser avaliada a repetibilidade da montagem do referencial no dispositivo que, no ensaio de calibração proposto, ocorrerá *in situ*.

Tratando-se de um ensaio de campo, não existe controlo das condições ambientais conforme se verifica em ambiental laboratorial convencional, contudo, é possível especificar um conjunto de condições de observação que devem ser respeitadas de modo a mitigar, por um lado, o efeito de fenómenos atmosféricos perturbadores, nomeadamente, de turbulência e de refração decorrentes de gradientes térmicos acentuados no cenário de observação e, por outro lado, o efeito de vibrações induzidas por acções estruturais (tráfego, vento, escoamentos fluviais ou marítimos, entre outros), sobretudo, ao nível de regiões estáticas intervenientes na operação de calibração (por exemplo, em fundações e ancoragens). Deste modo, as condições ambientais ideais, estabelecidas para a realização do ensaio de calibração em campo, estão associadas à realização de observações no inverno em período noturno ou diurno, na proximidade da aurora ou do ocaso e na ausência de acções estruturais significativas.

3.9.3 Cadeia de rastreabilidade metrológica

Nesta secção é apresentada a cadeia de rastreabilidade metrológica associada ao sistema de medição estudado, ou seja, é apresentada *a sequência de padrões e calibrações que é usada para relacionar o resultado da medição dimensional pretendida a uma referência* [VIM (2012)]. A cadeia de rastreabilidade é assim definida por uma hierarquia de calibração, isto é, uma *sequência de calibrações de uma determinada referência até ao sistema de medição final, em que o resultado de*

cada calibração depende da calibração prévia [VIM (2012)] e onde a incerteza de medição aumenta com as sucessivas calibrações. Neste enquadramento, os resultados obtidos de medição dimensional em infraestruturas dinâmicas, adquirirão a pretendida rastreabilidade metrológica ao SI.

No topo desta cadeia de rastreabilidade dimensional (*vide* Figura 3.56) encontra-se a definição internacional da unidade de base do SI da grandeza comprimento – o metro (m) – que de acordo com a sua atual definição pelo BIPM corresponde ao *comprimento do trajeto percorrido pela luz, no vácuo, durante um intervalo de tempo de 1/299 792 458 do segundo* [R1 CGPM (1983)]. Neste nível, compete ao BIPM promover e validar (por comparação) a sua realização prática nos diferentes Laboratórios Nacionais de Metrologia (LNM) mediante comparações-chave (*key comparisons*)⁴² garantindo, deste modo, a sua harmonização e normalização.

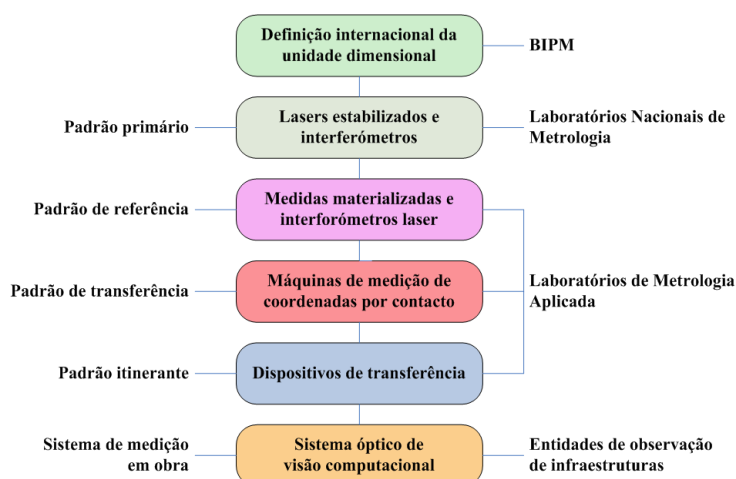


Figura 3.56: Cadeia de rastreabilidade dimensional para o sistema de medição.

Nos LNM, a realização primária do metro é efetuada com base no comprimento de onda de laser de hélio-néon estabilizado que suporta, usando técnicas de interferometria óptica, a calibração dimensional de padrões secundários como medidas materializadas (blocos padrão, entre outros) e interferómetros laser que, por sua vez, constituem padrões de referência de Laboratórios de Metrologia Aplicada permitindo a subsequente realização de calibrações de padrões de transferência e de trabalho (micrómetros, paquímetros, comparadores, máquinas de medição de coordenadas, entre outros instrumentos de medição).

⁴² A este nível, considerando que os padrões realizados pelos LNM têm níveis de exatidão equivalentes, os ensaios de aptidão substituem-se por comparações com valor de consenso.

Tendo em conta o método de calibração descrito na secção 3.9.2, recomenda-se o recurso a MMC 3D por contacto como padrão de transferência laboratorial para a execução da calibração do padrão itinerante – dispositivo de transferência para montagem do referencial em posições de referência – entre o laboratório e a infraestrutura, na qual se efetua o ensaio de campo de calibração do sistema óptico.

3.10 Considerações finais

Neste Capítulo desenvolveu-se uma abordagem óptica para a medição dimensional terrestre de infraestruturas dinâmicas a longa distância, incluindo a formulação teórica associada ao dimensionamento de um sistema de medição específico e ao método de medição proposto, onde se incluem o processamento digital de imagem dos alvos e os modelos matemáticos representativos do elemento recetor (câmara), bem como, dos fenómenos atmosféricos – atenuação, refração e turbulência – que afetam o meio de propagação e, consequentemente, a medição pretendida.

A evolução desta etapa (conceptual) de desenvolvimento do sistema de medição para uma etapa posterior de concretização experimental é marcada por uma diferença entre o seu desempenho metrológico ideal e real que importa conhecer, de modo a avaliar fundamentadamente a adequação do referido sistema ao problema de medição estudado. Por este motivo, foram apresentados os processos de caracterização metrológica dos principais componentes do sistema de medição – câmara e referencial – estabelecendo-se a necessária rastreabilidade ao SI, mediante o desenvolvimento de um método de calibração contendo um protótipo de um padrão de referência.

O Capítulo 4, que se segue, contempla os processos de concretização e de validação das soluções apresentadas visando a observação dimensional dinâmica de uma ponte suspensa com elevada dimensão: a P25A, em Lisboa. Este cenário de observação constitui um caso exemplar para a aplicação da abordagem proposta, para o qual se definiu um projeto de aplicação. Para a sua concretização foi produzido um sistema de medição dedicado, visando a quantificação do deslocamento dinâmico do $\frac{1}{2}$ vão principal, bem como, um conjunto de estudos experimentais para avaliação de influência dos fenómenos de refração e de turbulência atmosférica e a caracterização metrológica, calibração e medição.

4. OBSERVAÇÃO DIMENSIONAL DINÂMICA DE UMA PONTE SUSPENSA

4.1 Introdução

Este Capítulo descreve o conjunto de estudos experimentais associados à concretização e validação da metodologia óptica para medição dimensional terrestre de infraestruturas dinâmicas descrita anteriormente no Capítulo 3, tendo como cenário de observação a Ponte 25 de Abril (P25A) em Lisboa.

A descrição do cenário de observação (sub-capítulo 4.2) inclui uma breve apresentação dos principais aspetos dimensionais da P25A, bem como, a evolução histórica da atividade de observação realizada desde a sua construção, entrada ao serviço (incluindo ensaios de carga), exploração e reforço estrutural, culminando com a apresentação do plano de observação a longo prazo, atualmente em vigor. Em seguida, é apresentado o sistema de medição desenvolvido para este cenário de observação (sub-capítulo 4.3) tendo em vista a medição do deslocamento dinâmico do $\frac{1}{2}$ vão principal da P25A.

O sub-capítulo 4.4 é dedicado aos ensaios de parametrização intrínseca da câmara aplicada na P25A, realizados pelo método DOE, sendo descrita a montagem experimental desenvolvida e a atividade de processamento de imagem. Neste âmbito são apresentados os resultados obtidos e promovida a sua análise, onde se inclui a avaliação das incertezas de medição associadas aos parâmetros intrínsecos quantificados.

Por sua vez, o sub-capítulo 4.5 aborda o estudo da influência térmica do meio de propagação em diferentes épocas do ano (inverno/verão), nomeadamente, os estudos experimentais da refração atmosférica e do efeito de feixe errante por turbulência, incluindo: (i) a montagem experimental para a medição *in situ* dos gradientes termohigrométricos em locais de interesse da P25A, que suportaram a identificação de condições de estabilidade atmosférica e a quantificação de desvios sistemáticos das coordenadas mundo dos alvos devido à refração segundo diferentes abordagens matemáticas; (ii) o método de ensaio para avaliação da dispersão das coordenadas imagem dos alvos por efeito de feixe errante.

No sub-capítulo 4.6 são descritos os ensaios dimensionais do referencial de medição instalado na P25A e do padrão de referência desenvolvido para a calibração *in situ* do sistema de medição, de onde resultou o conhecimento das estimativas das coordenadas mundo dos alvos em posições de referência. Este sub-capítulo inclui, igualmente, a descrição dos ensaios de calibração do sistema de medição na P25A em épocas do ano distintas e a análise dos respetivos desvios de calibração obtidos.

O sub-capítulo 4.7 promove a avaliação de incertezas de medição associadas aos desvios de calibração obtidos, abrangendo a formulação probabilística das grandezas de entrada e a respetiva propagação até às grandezas de saída, incluindo uma análise de sensibilidade para identificação das componentes de incerteza predominantes.

Por último, no sub-capítulo 4.8 são descritas as campanhas de ensaios em campo efetuadas na P25A tendo em vista a medição de deslocamento dinâmico do seu $\frac{1}{2}$ vão principal na ausência e na presença de tráfego ferroviário no tabuleiro inferior da sua viga de rigidez.

4.2 Cenário de observação

Neste sub-capítulo descreve-se o cenário de observação da P25A, ilustrada na Figura 4.1, onde se apresenta a nomenclatura adotada neste estudo para designar os seus principais componentes estruturais.



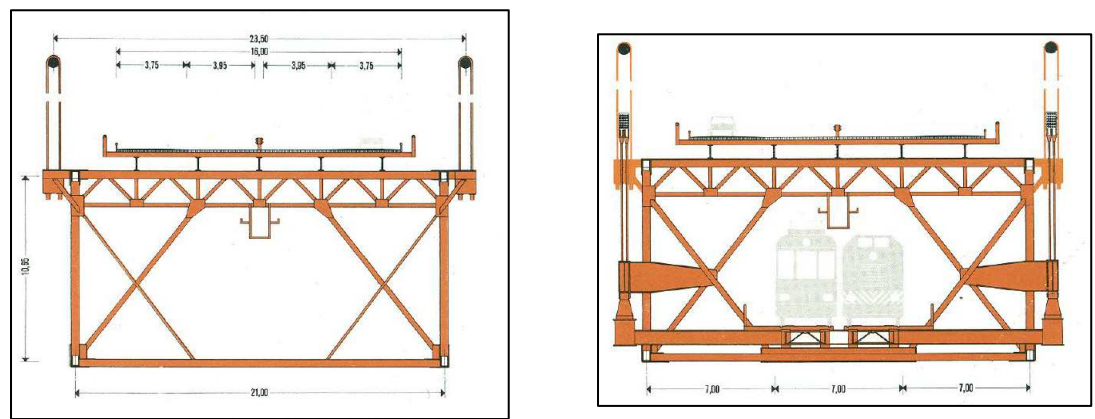
Figura 4.1: A P25A e região envolvente das margens norte e sul do rio Tejo em Lisboa.

Esta ponte suspensa de elevada dimensão constitui uma via de comunicação entre as margens norte e sul do rio Tejo em Lisboa, cuja primeira fase de construção, contemplando apenas um tabuleiro rodoviário superior com quatro vias, foi finalizada em 1966. A segunda fase de construção foi concluída em 1999 e incluiu o seu reforço estrutural tendo em vista o alargamento do tabuleiro rodoviário superior para seis vias

e a construção do tabuleiro ferroviário inferior com duas vias. As principais características dimensionais desta ponte e do respetivo viaduto norte são apresentadas sumariamente no Quadro 4.1 e nas Figuras 4.2 a 4.4 [MOP-GPT (1966)], [Rodrigues (2011-b)].

Quadro 4.1: Principais características dimensionais da P25A e do viaduto norte.

Ponte suspensa		Vãos do viaduto norte	
Cota nominal do tabuleiro rodoviário	74 m	P7-P8	82 m
Altura das torres de suspensão	191 m	P8-P9-P10-P11-P12;P15-P16-P17-P18	76 m
Secção da viga de rigidez	21 m × 11 m	P12-P13-P14-P15	74 m
Vão principal (P3-P4)	1 013 m	P18-P19	53 m
Vãos laterais (P2-P3; P4-P5)	483 m; 483 m	P19-P20	32 m
Vãos não-suspensos (P1-P2; P5-P6; P6-P7)	99 m; 100 m; 100 m	P20-A21	24 m
Comprimento total (P1-P7)	2 278 m	Comprimento total (P7-A21)	945 m



Figuras 4.2 e 4.3: Perfis transversais da viga de rigidez e tabuleiros da P25A na 1ª fase de construção (à esq.) e na 2ª fase de construção (à dir.).

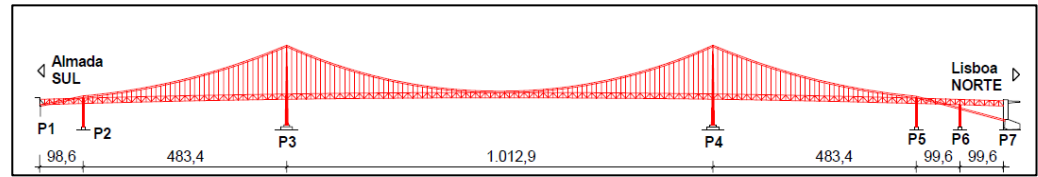


Figura 4.4: Alçado longitudinal da P25A.

A atividade de observação da P25A remonta à primeira fase da sua construção (entre 1962 e 1966), a qual visava a deteção de erros de montagem dos seus principais componentes estruturais e o conhecimento da evolução temporal do estado de tensão da obra, com particular interesse para a segunda fase de construção. No Quadro 4.2 são apresentados os principais tipos de observações realizadas na fase de construção da P25A [Marécos (1967)].

Quadro 4.2: Principais tipos de observações realizadas na P25A entre 1962 e 1966.

Grandezas	Locais de medição	Instrumentos de medição
Extensão	Torres, viga de rigidez e viaduto norte	Alongâmetro e extensómetros
Rotação	Torres, ancoragens e viaduto norte	Clinómetro de corda vibrante e de bolha
Deslocamento vertical e horizontal	Ancoragens	Instrumentos geodésicos
Deslocamento longitudinal e transversal (em ensaio dinâmico)	Fundações das torres	Transdutor de deslocamento
Deslocamento vertical	Viaduto norte	Instrumentos geodésicos e nível hidrostático

Após a conclusão da primeira fase de construção da P25A foram realizados, em julho de 1966, ensaios de observação em regime estático e dinâmico visando a receção da obra previamente ao início da sua exploração. No conjunto de ensaios realizados [Marécos(1967)] é possível destacar:

- (i) **ensaios de cargas concentradas** para determinação de linhas de influência associadas ao deslocamento vertical:
 - (a) na ponte suspensa, com materialização da carga aplicada mediante recurso a oito camiões com peso individual de 300 kN distribuídos por duas linhas, preenchendo as quatro vias de circulação no tabuleiro rodoviário e ocupando cerca de 15,5 m a nível longitudinal;
 - (b) no viaduto norte, mediante distribuição transversal simétrica de quatro camiões com peso total de 1200 kN e de forma assimétrica com recurso a apenas dois camiões com peso total de 600 kN;
- (ii) **ensaios de cargas distribuídas** para determinação de linhas de influência associadas ao deslocamento vertical em situação de sobrecarga:
 - (a) na ponte suspensa (*vide* Figura 4.5) [Marécos (1967)], recorrendo a 79 camiões com um peso total de, aproximadamente, 15500 kN distribuídos por diferentes posições longitudinais e ocupando distâncias variáveis ao longo do tabuleiro rodoviário (253 m, 345 m e 690 m), com distribuição transversal simétrica ou assimétrica;
 - (b) no viaduto norte, com uma carga distribuída de, aproximadamente, $37 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ em cada faixa, mediante recurso a 26 camiões;
- (iii) **ensaios dinâmicos de vibração livre:**
 - (a) na ponte suspensa, por imposição de deformação inicial no cabo principal no $\frac{1}{2}$ vão principal através de amarração de cabo sujeito a tração por ação de uma grua flutuante no rio Tejo; a libertação súbita

da amarração ocorreu por ação de elemento mecânico fusível (de 100 kN), tendo-se observado a resposta estrutural da ponte com recurso a extensómetros instalados nas cordas da viga de rigidez no $\frac{1}{2}$ vão principal;

- (b) no viaduto norte, por passagem sobre ressalto, de um ou dois camiões circulando a $20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ e a $40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

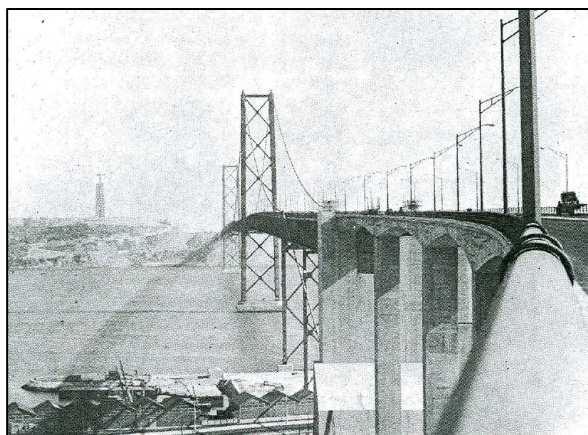


Figura 4.5: Deformação vertical da P25A durante ensaio de carga distribuída.

Na ponte suspensa, a medição dos deslocamentos verticais do vão principal nos ensaios estáticos (de carga concentrada e distribuída) foi realizada com recurso a um teodolito posicionado na fundação da torre norte (P4) e a alvos de pontaria instalados nas duas cordas inferiores da viga de rigidez nas secções de $\frac{1}{2}$ e $\frac{1}{4}$ de vão [Marécos (1967)]. No que se refere aos ensaios dinâmicos de vibração livre, a resposta estrutural da ponte foi obtida através da instalação, no $\frac{1}{2}$ vão principal, de extensómetros de indução nas quatro cordas da viga de rigidez. Nos ensaios realizados no viaduto norte foi possível utilizar comparadores de tambor e extensómetros para a medição da respetiva resposta estrutural.

Entre 1966 e 1977, a P25A foi sujeita a uma observação contínua a longo prazo tendo por objetivo avaliar a evolução temporal do estado de tensão da viga de rigidez, determinando a sua conformidade para a concretização da segunda fase de construção, e o estudo do seu comportamento dinâmico quando sujeita à ação sísmica e do vento. Este objetivo foi alcançado mediante a instalação de um sistema automático de recolha das medições provenientes de instrumentos e sistemas de observação permanente na P25A, conforme se ilustra na Figura 4.6. [Marécos (1967)].

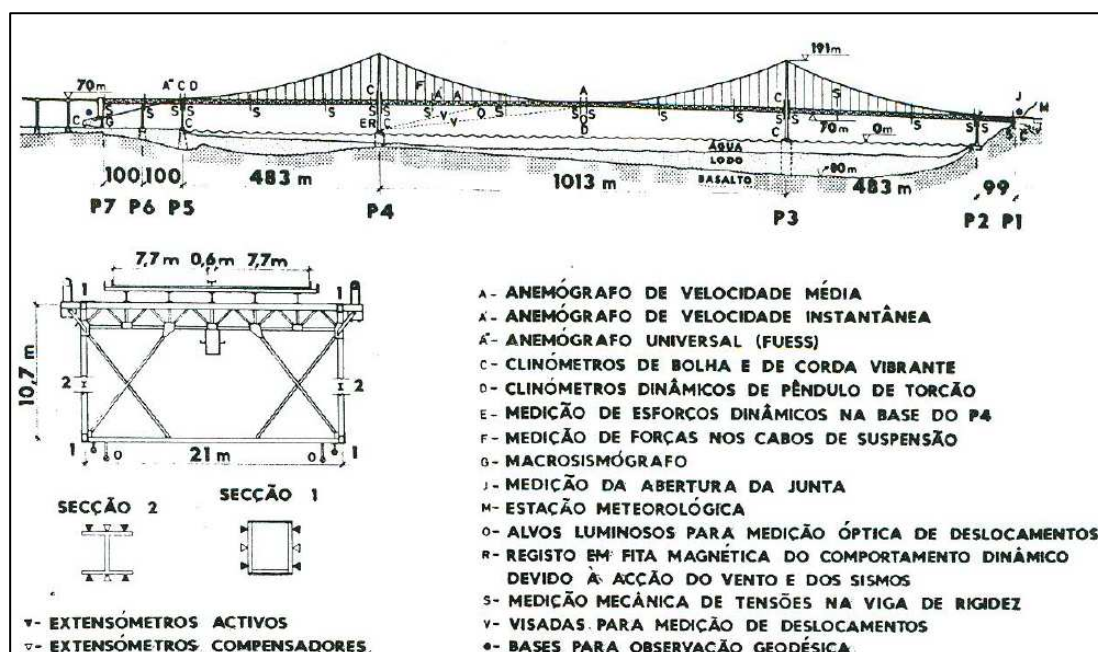


Figura 4.6: Plano geral de observação a longo prazo (1966-1977) da P25A.

Em maio de 1999 foi realizado um novo conjunto de ensaios de observação da P25A, após conclusão da segunda fase de construção relativa à instalação de tabuleiro inferior ferroviário e alargamento do tabuleiro superior rodoviário para seis vias. No conjunto de ensaios de receção realizados, destaca-se a determinação de linhas de influência associadas ao deslocamento vertical [Castanheta (1999)] mediante:

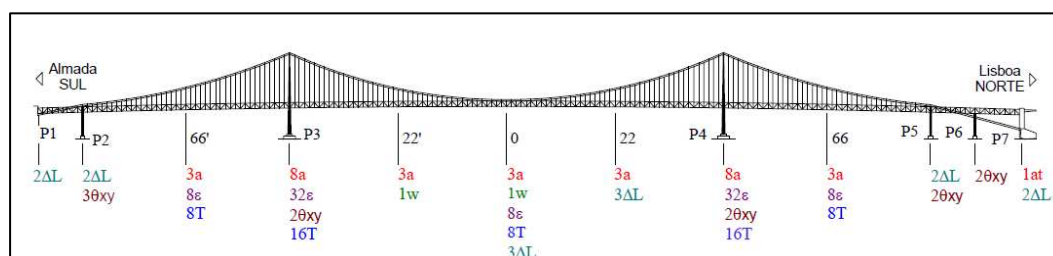
- (i) ensaios de cargas concentradas, com recurso a duas locomotivas com peso total de 2294 kN num comprimento de 14 m;
- (ii) ensaios de cargas distribuídas, com materialização de carga através de comboios compostos por locomotivas e vagões de transporte, com peso total de 13950 kN num comprimento de 180 m.

Menciona-se, igualmente, a realização de ensaios dinâmicos de medição de vibração ambiente com recurso a macrossismógrafos tendo em vista a identificação modal (amortecimento, frequências e configurações dos principais modos de vibração) da P25A após reforço estrutural concretizado na segunda fase de construção [Rodrigues (2004)].

Atualmente, o plano geral de observação a longo prazo da P25A [Silveira (2002-a)] [Silveira (2002-b)], representado de forma esquemática na Figura 4.7 [Rodrigues (2011-b)], contempla a instrumentação indicada no Quadro 4.3.

Quadro 4.3: Instrumentação para observação a longo prazo da P25A¹.

Tipo de instrumentação	Mensurandas e locais de medição
Acelerómetros servocontrolados	<p>Aceração vertical e transversal nas secções 66', 22', 0, 22 e 66</p> <p>Aceração transversal e longitudinal na base e no topo das torres (P3 e P4)</p> <p>Aceração triaxial na base do pilar P7</p>
Extensómetros de resistência elétrica	<p>Extensão nas secções 66', 0 e 66 da viga de rigidez</p> <p>Extensão em três secções (na base, ao nível do tabuleiro rodoviário e 20 m acima deste último) das torres (P3 e P4)</p>
Termístores do tipo NTC	<p>Temperatura nas secções 66', 0 e 66 da viga de rigidez</p> <p>Temperatura em duas secções (na base e 20 m acima do nível do tabuleiro rodoviário) das torres (P3 e P4)</p>
Clinómetros	Rotação nos pilares P2 a P6
Anemómetros de ultrassons	Velocidade do vento em três direcções ortogonais nas secções 22' e 0
Transdutores de deslocamento linear magnetostritivos	<p>Deslocamento longitudinal no topo dos pilares P1, P2, P5 e P7</p> <p>Deslocamento longitudinal relativo entre tabuleiro rodoviário e a viga de rigidez nas secções 0 e 22.</p>



Legenda: ΔL – transdutor de deslocamento; w – anemómetro; θ_{xy} – clinómetro; T – termístor; ε – extensómetro; a – acelerómetro.

Figura 4.7: Plano geral de instrumentação da P25A.

A concretização do referido plano está em curso permitindo, no momento presente, a recolha automática de medições relativas a três secções da viga de rigidez no $\frac{1}{2}$ vão dos tramos suspensos com recurso a rede local de fibra óptica [Rodrigues (2011-b)].

A integração pontual ou permanente de um sistema óptico permitiria complementar o conhecimento do comportamento estrutural da P25A no que respeita ao deslocamento tridimensional da viga de rigidez, em particular, nas secções relativas a $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ vão principal, sem necessidade de interrupção do tráfego rodoviário e ferroviário. Note-se que, no caso do deslocamento, o atual plano de instrumentação apenas contempla a medição contínua de deslocamento longitudinal das ancoragens norte e sul e do deslocamento relativo entre o tabuleiro rodoviário e a viga de rigidez.

¹ Não inclui a instrumentação associada à observação permanente do viaduto norte.

4.3 Sistema de medição

4.3.1 Aplicação no cenário de observação

O estudo e validação da abordagem óptica descrita no Capítulo 3 foram suportados no desenvolvimento de um sistema de medição dinâmica de deslocamento tridimensional do $\frac{1}{2}$ vão principal da P25A, a qual constitui uma região de elevado interesse para análise visto estar associada à região estrutural com deslocamento dinâmico de maior amplitude verificado, sobretudo, na direção vertical.

Estando a câmara rigidamente fixada na superfície inferior da viga de rigidez no $\frac{1}{2}$ vão principal, importa definir o posicionamento e a orientação do referencial de medição numa região estática próxima. A minimização da distância de observação é assegurada através do posicionamento do referencial na fundação de uma das torres da P25A (por motivos logísticos, a fundação da torre sul é preferida em relação à fundação da torre oposta). A orientação do referencial é determinada pelo seu alinhamento com as direções de deslocamento da viga de rigidez (longitudinal, vertical e transversal). Nesta configuração geométrica, representada na Figura 4.8, e tendo em conta as dimensões nominais da P25A [MOP-GPT (1966)], a distância de observação estabelecida entre a câmara (no $\frac{1}{2}$ vão principal) e o referencial (fundação da torre sul) corresponde a, aproximadamente, 510 m. A linha de visão entre estas duas posições apresenta uma elevação de, aproximadamente, 7° relativamente à superfície do topo da fundação.

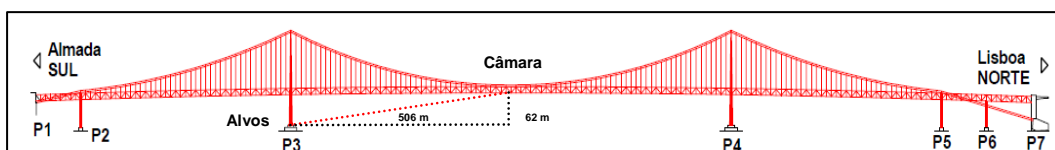


Figura 4.8: Representação esquemática da configuração de medição na P25A.

A adoção desta configuração dificulta a medição do deslocamento longitudinal do $\frac{1}{2}$ vão principal da P25A, visto exigir uma elevada sensibilidade de medição nessa direção, ou seja, uma resolução instrumental angular requerida com magnitude bastante reduzida (inferior a $0,1 \mu\text{rad}$), para a qual não existem câmaras que satisfaçam esse requisito. De facto, conforme se mencionou no Capítulo 3, a solução mais favorável no conjunto de câmaras comercialmente disponíveis (distância focal de 800 mm, dimensão de píxel igual a $2,5 \mu\text{m}$ e nível de exatidão de processamento

de imagem correspondente a $\frac{1}{4}$ de píxel) conduz a uma resolução angular instrumental próxima de 1 μ rad. Esta limitação é minimizada pela existência de cadeias elétricas com transdutores unidimensionais nas regiões de encontro dos pilares P1, P2, P5 e P7 com a viga de rigidez da P25A, os quais asseguram a medição de deslocamento longitudinal, conforme se ilustra na Figura 4.9 [Santos (2011)], para a situação operacional associada a tráfego ferroviário, notando-se uma amplitude de deslocamento longitudinal de, aproximadamente, 80 mm.

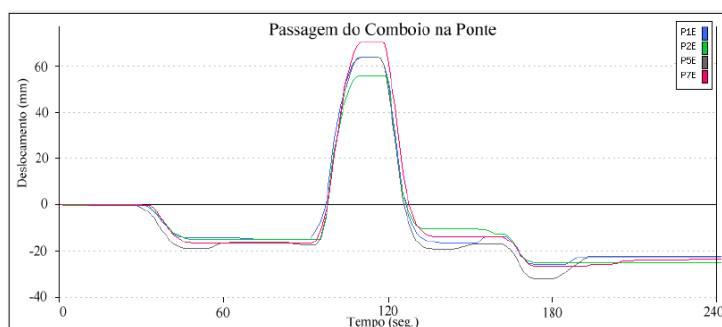


Figura 4.9: Deslocamento longitudinal da viga de rigidez da P25A junto aos pilares P1, P2, P5 e P7 (lado este).

No que respeita à medição de deslocamentos verticais e transversais do $\frac{1}{2}$ vão principal, a configuração de medição mencionada anteriormente determina que, para a medição de deslocamentos verticais e transversais com amplitude de 1 mm, o sistema de medição possua uma resolução angular instrumental igual a 2 μ rad. Este requisito implica que o processamento digital de imagem dos alvos possua um nível de exatidão na ordem de grandeza de sub-píxel, conforme se nota na Figura 3.10 na secção 3.3.3.

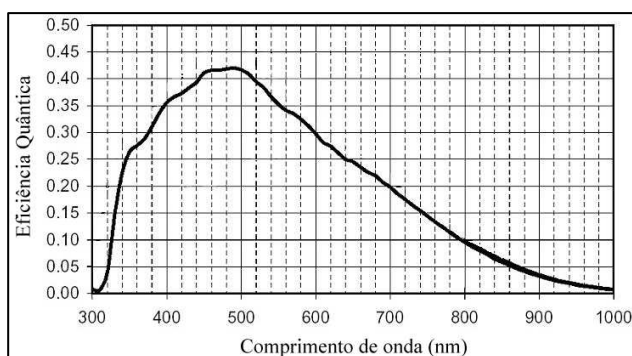
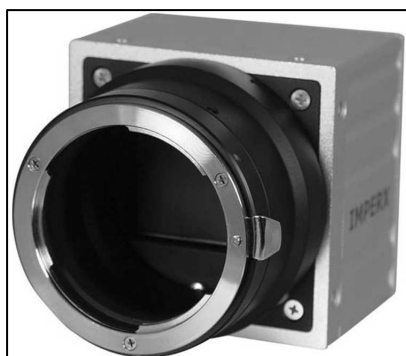
No que se refere à câmara, o cumprimento deste requisito de resolução angular instrumental está dependente da sua distância focal e da dimensão do píxel. Por exemplo, considerando um nível de exatidão de processamento digital de imagem igual a $\frac{1}{4}$ de píxel (*vide* Figura 3.6 na secção 3.3.3), o recurso a uma câmara com distância focal igual ou superior a 600 mm e dimensão do píxel não superior a 5 μ m assegura o cumprimento deste requisito.

4.3.2 Câmara

No âmbito dos estudos experimentais desenvolvidos na concretização e validação de sistema para medição de deslocamentos no ½ vão principal da P25A, foi possível recorrer a um conjunto de componentes optoeletrónicos para composição da câmara utilizada para esse efeito. Nesta secção são mencionadas as principais características nominais desses elementos e o seu impacto no cumprimento dos requisitos de medição exigidos para o cenário de observação estudado. No conjunto de elementos constituintes da câmara destacam-se: o sensor e placa de aquisição de imagem digital e respetiva aplicação computacional, a teleobjetiva de elevada distância focal e o duplicador e filtro ópticos.

O sensor de imagem utilizado (modelo IPX-2M30H-LMF da marca Imperx, apresentado na Figura 4.10) [Imperx (2006)] é caracterizado pelos seguintes itens:

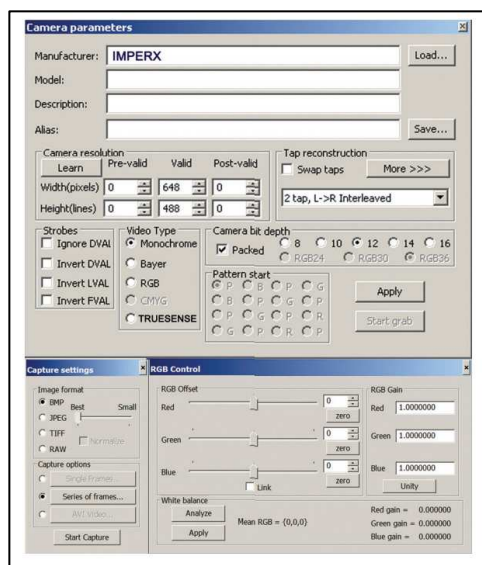
- tipo de sensor – CCD pancromático;
- tipo de abertura – global (não-deslizante);
- interface óptica – tipo F;
- interface digital de comunicação – *Camera Link*;
- tempo de exposição – variável entre 0,03 ms e 67 ms;
- área ativa do sensor – $(15,90 \times 8,61) \cdot \text{mm}^2$;
- forma geométrica do píxel – quadrado;
- dimensão linear do píxel – $7,4 \mu\text{m}$;
- número de píxeis – (1920×1080) , aproximadamente, 2 megapíxeis;
- resolução radiométrica – 8, 10 ou 12 bits;
- relação sinal-ruído – 60 dB;
- frequência de aquisição de imagem – 15 imagens por segundo (em modo de imagem singular);
- banda espectral – abrange as regiões do visível e do infravermelho próximo, conforme ilustrado na Figura 4.11 [Imperx (2006)].



Figuras 4.10 e 4.11: Sensor de imagem utilizado (à esq.) e respectiva sensibilidade espectral (à dir).

Foi igualmente utilizada uma placa de aquisição de imagem (marca Imperx, modelo *Framelink*, com interface do tipo PCMCIA, ilustrada na Figura 4.12) [Imperx (2004)], para estabelecer a comunicação com o sensor e para a transferência das imagens adquiridas para o dispositivo de armazenamento e processamento (no presente estudo, um computador portátil no qual se instalou o programa *FrameLink Application* dedicado à visualização e gestão de parâmetros operacionais – vide Figura 4.13 [Imperx (2005)]), nomeadamente:

- (i) tempo de exposição;
- (ii) tipo de aquisição de imagem (singular ou sequencial);
- (iii) frequência e duração do processo de aquisição;
- (iv) formato da imagem (BMP, JPEG ou TIFF).



Figuras 4.12 e 4.13: Placa de aquisição de imagem (à esq.) e janela da aplicação (à dir).

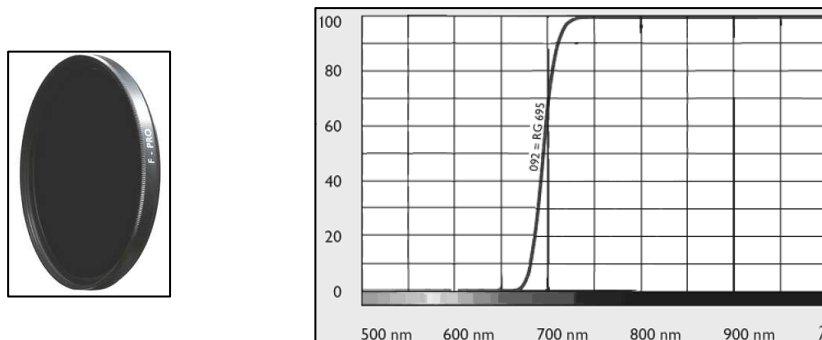
Relativamente à objetiva foi utilizada uma teleobjetiva com distância focal fixa de 300 mm e abertura ($f/\#$) variável entre $f/32$ e $f/2,8$ – fabricante Sigma, modelo 300 mm/2.8 APO EX DG, ilustrada na Figura 4.14 [Santos (2011)] – em conjunto com um duplicador óptico de distância focal – fabricante Sigma, modelo APO 2.0× EX DG, apresentado na Figura 4.15 [Santos (2011)] – de forma a obter uma distância focal nominal conjugada de 600 mm. Do ponto de vista económico, esta solução apresenta um custo inferior à aquisição de uma teleobjetiva com distância focal fixa igual ou superior a 600 mm.



Figuras 4.14 e 4.15: Teleobjetiva (à esq.) e duplicador óptico (à dir).

O conhecimento das dimensões lineares do sensor (15,90 mm × 8,61 mm), da distância focal nominal da câmara (600 mm) e da distância de observação (510 m) permite, por aplicação da expressão 3.7 (na secção 3.3.5), determinar o campo de visão produzido no sistema óptico, ou seja, 13,5 m × 7,3 m. Face à magnitude dos deslocamentos verticais máximos exetáveis do ½ vão principal da P25A (na ordem de grandeza do metro) [Marécos (1967)], o campo de visão é suficiente para a realização das medições pretendidas, sugerindo-se que a orientação angular da câmara em torno do seu eixo óptico seja efetuada de modo a garantir que a maior dimensão lateral do campo de visão (13,5 m) esteja associada à direção vertical.

Tendo por objetivo a eliminação da radiação ambiente visível e a consequente melhoria de contraste dos alvos ativos (que emitem na região do infravermelho próximo) nas imagens adquiridas, a referida teleobjetiva permitiu a utilização de um filtro óptico – marca Schneider Kreuzanach, modelo B+W 092 infrared filter 695, com diâmetro igual a 46 mm, ilustrado na Figura 4.16 – do tipo passa-alto, para bloqueamento de radiação visível com comprimento de onda até 650 nm, apresentando uma transmitância superior a 90% na região visível do vermelho e do infravermelho próximo, conforme se apresenta na Figura 4.17 [Santos (2011)].



Figuras 4.16 e 4.17: Filtro óptico e respetiva transmitância espectral.

4.3.3 Referencial de medição

O desenvolvimento do referencial de medição com alvos ativos para aplicação na fundação da torre sul da P25A procurou satisfazer os seguintes requisitos:

- (i) a distribuição espacial dos quatro alvos ativos num espaço tridimensional segundo direções ortogonais associadas aos principais deslocamentos da viga de rigidez (vertical, transversal e longitudinal);
- (ii) a discriminação individual dos quatros alvos tendo em conta as respetivas linhas de visão estabelecidas com o ½ vão;
- (iii) a visibilidade permanente dos quatros alvos considerando a existência de deslocamentos com magnitude elevada, sobretudo, a nível vertical durante a passagem de tráfego ferroviário;
- (iv) a integridade posicional dos alvos no processo de caraterização laboratorial dimensional e no conseqüente transporte manual² e instalação na P25A tendo em conta os constrangimentos de acesso existentes.

O cumprimento destes requisitos conduziu ao desenvolvimento da solução apresentada na Figura 4.18, formada por perfis de alumínio com interligações aparafusadas entre si, que suportam os quatro alvos ativos que materializam o referencial de medição e cuja identificação e distanciamento mútuo nominal constam na Figura.

² O acesso à fundação da torre sul da P25A é realizado por travessia pedonal na viga de rigidez desde a ancoragem sul até à torre sul, na qual é possível aceder à respetiva fundação através de ascensor existente no seu interior.

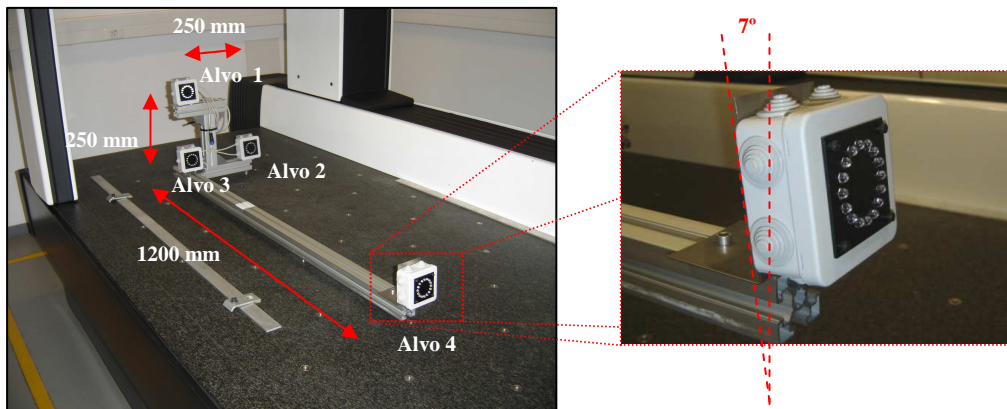


Figura 4.18: Referencial de medição com alvos ativos.

No referencial apresentado salientam-se os seguintes aspetos:

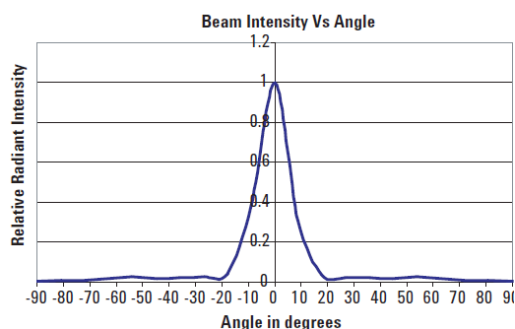
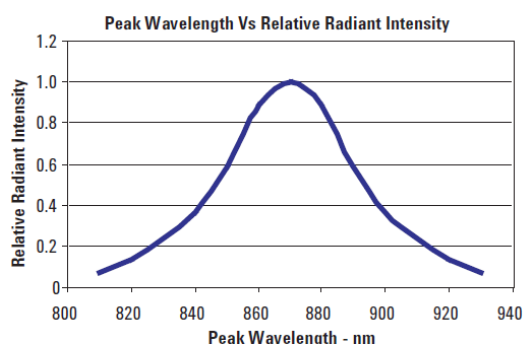
- (i) o pormenor construtivo da inclinação vertical dos alvos (aproximadamente, 7°) tendo por objetivo o alinhamento da direção dominante de emissão de radiação dos alvos com a respetiva linha de visão estabelecida com a câmara instalada a $\frac{1}{2}$ vão, de modo a melhorar a imagem dos alvos na câmara;
- (ii) a criação de uma zona escura em torno dos LEDs que formam cada alvo ativo tendo em vista a intensificação do contraste nas imagens recolhidas;
- (iii) a utilização de uma dimensão de um dos eixos com magnitude superior (1200 mm) às dos dois restantes (250 mm), para o alinhamento com a direção de deslocamento longitudinal da P25A de modo a salvaguardar a inexistência de sobreposição entre os alvos 3 e 4 na imagem do referencial;
- (iv) a adoção de alvos com forma geométrica de coroa circular, compostos por 16 LEDs de encapsulamento semiesférico (5 mm de diâmetro), dispostos segundo uma circunferência com diâmetro da ordem de 42,5 mm (*vide* Figura 4.18).

Tendo em conta a distância focal (600 mm) e a dimensão do píxel ($7,4 \mu\text{m}$) associados à câmara, bem como a distância de observação (510 m) entre a fundação da torre e o $\frac{1}{2}$ vão principal, a resolução espacial (*vide* expressão 3.6, secção 3.3.4) do sistema de medição é de 6,3 mm, pelo que a dimensão global mínima do alvo (seguindo a regra indicada na secção 3.3.4) é, aproximadamente, de 44 mm. Este valor suportou o dimensionamento dos alvos do referencial, notando que o diâmetro exterior nominal da coroa circular corresponde a 45 mm.

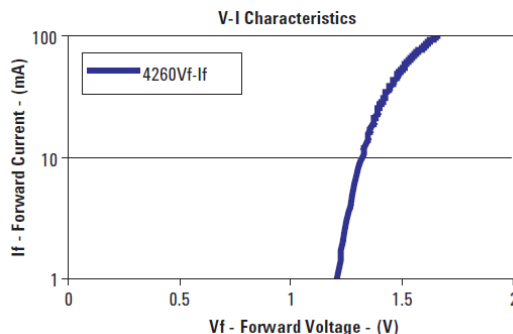
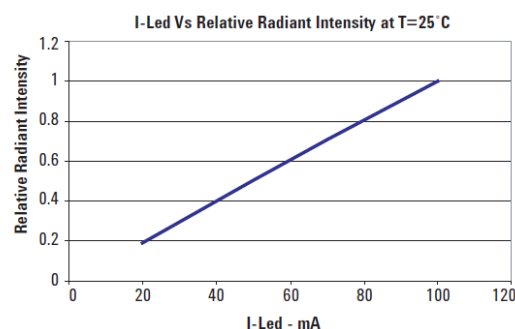
No Quadro 4.4 é possível encontrar o resumo das principais características [Avago (2006)] do tipo de LED (marca Avago Technologies, modelo HSDL-4260) utilizado na construção dos alvos ativos. Por sua vez, nas Figuras 4.19 a 4.22, são apresentadas as representações gráficas associadas ao seu comportamento radiométrico e termoeletrico [Avago (2006)].

Quadro 4.4: Características radiométricas e termoeletricas do LED utilizado (a 25 °C).

Características radiométricas		Características termoeletricas	
Material semiconductor	Arseneto de gálio e alumínio (AlGaAs)	Intensidade de corrente elétrica direta máxima	100 mA
Intensidade energética máxima	200 mW·sr ⁻¹ (para $I_d = 100$ mA)	Tensão elétrica direta	1,4 V – 1,7 V (20 mA ≤ I_d ≤ 100 mA)
Coefficiente térmico da intensidade	-0,36 %·°C ⁻¹ (para $I_d = 100$ mA)	Coefficiente térmico da tensão elétrica direta	-1,3 mV·°C ⁻¹
Pico de comprimento de onda	875 nm (IV próximo)	Limites operacionais de temperatura	-40 °C a 85 °C
Largura de banda espectral	45 nm (para $I_d = 20$ mA)	Temperatura da junção	110 °C
Coefficiente térmico do pico de comprimento de onda	0,2 nm·°C ⁻¹ (para $I_d = 100$ mA)	Potência dissipada	230 mW
Ângulo de visão	15°	Resistência térmica	300 °C·W ⁻¹



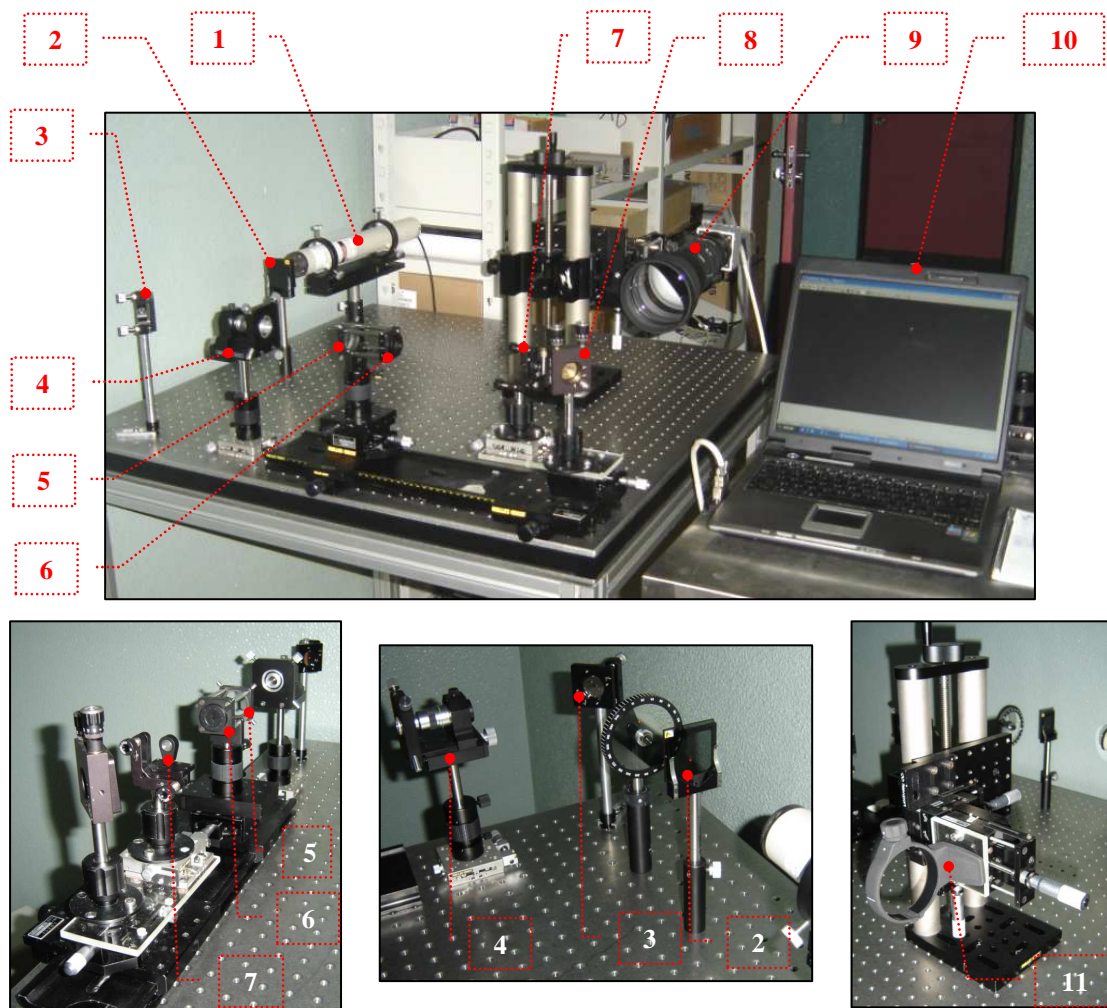
Figuras 4.19 e 4.20: Perfis de intensidade relativa em função do comprimento de onda (à esq.) e do ângulo em relação ao eixo óptico do LED (à dir.)



Figuras 4.21 e 4.22: Relação entre intensidade de corrente direta e intensidade radiante relativa (à esq.) e tensão elétrica direta (à dir.).

4.4 Parametrização intrínseca da câmara

A câmara de ensaio foi submetida a ensaios de caracterização geométrica visando a quantificação de estimativas e incertezas de medição dos respetivos parâmetros intrínsecos: distância focal, coordenadas imagem do ponto principal e coeficiente de distorção radial. A concretização experimental desta tarefa foi suportada no recurso ao método DOE (*vide* Capítulo 3), aplicada numa montagem específica apresentada na Figura 4.23. O Quadro 4.5 menciona as principais características da rede de difração (Figura 4.24) utilizada como DOE [Holoeye (2012)] na referida montagem.



Legenda: 1 – laser; 2 – filtro neutro; 3 – espelho; 4 – filtro espacial; 5 – lente de referência com $f = 150$ mm; 6 – abertura; 7 – DOE; 8 – espelho; 9 – sistema óptico; 10 – computador; 11 – suporte do sistema óptico.

Figura 4.23: Montagem experimental no Laboratório de Óptica, Lasers e Sistemas da FCUL.

Quadro 4.5: Principais características da rede de difração utilizada.

Fabricante e modelo:	Holoeye, DE-R-241
Material :	Polycarbonato (PC)
Diâmetro e espessura:	8 mm e 1,2 mm
Padrão de difração:	Matriz de pontos
Número de pontos:	$21 \times 21 = 441$
Ângulo total de difração (para $\lambda=635$ nm):	$4,8^\circ$
Período espacial:	$152,4 \mu\text{m}$



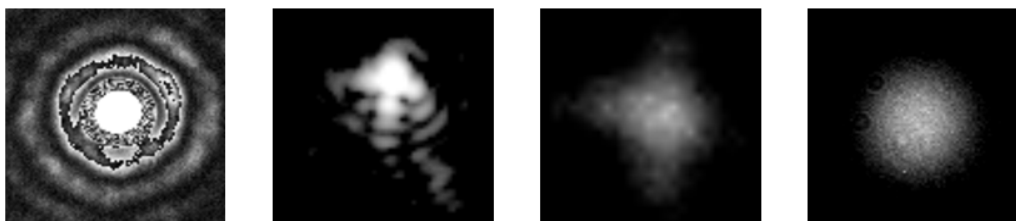
Figura 4.24: Rede de difração

Esta rede de difração está otimizada para 635 nm, origina o menor acréscimo de intensidade (aproximadamente 0,3%) do ponto de difração central (de ordem zero) em relação aos restantes pontos. O recurso a um laser com comprimento de onda distinto do valor ótimo determina um aumento significativo da diferença de intensidade entre o ponto central e os restantes pontos envolventes (entre 11% e 20% para comprimentos de onda iguais a 808 nm e 488 nm, respetivamente).

No caso da montagem efetuada, recorreu-se a um laser com um comprimento de onda de 633 nm, bastante próximo do valor ótimo pretendido, obtendo-se uma irradiância uniforme entre pontos, notando-se apenas um ligeiro acréscimo no ponto central. Este facto impediu que o sistema óptico ensaiado incluísse o filtro óptico do tipo passa-alto utilizado nos ensaios de campo para bloquear a radiação visível (até 650 nm) proveniente da zona envolvente aos alvos ativos observados. Deste modo, o sistema óptico foi ensaiado com filtro comum de bloqueamento de radiação ultravioleta, não sendo exetável um impacto na parametrização intrínseca pretendida.

Como o ângulo total de difração produzido pela rede ($4,8^\circ$) é superior ao ângulo de abertura da câmara ($0,8^\circ \times 1,5^\circ$), nem todas as ordens de difração puderam ser observadas, apenas $7 \times 3 = 21$ num total de 441 pontos disponíveis. Uma abertura mínima da câmara igual a 9 mm foi adotada nos ensaios de parametrização realizados, correspondendo a um valor próximo do diâmetro da rede difração utilizada (8 mm).

Nesta montagem experimental foi dada especial atenção à questão da atenuação, promovendo-se o ajuste da irradiância do feixe com um filtro neutro, de modo a evitar a saturação e danos no sensor. Em acréscimo, procurou-se garantir um alinhamento adequado entre os componentes ópticos, evitando a ocorrência de efeitos indesejados como desfocagem, reflexões, franjas de difração, feixe laser não-colimado e não-gaussiano, que afetam negativamente os perfis de irradiância das ordens de difração, conforme ilustrado na Figura 4.25.



*Figura 4.25: Pontos de difração com efeitos indesejados
(da esq. para a dir.: saturação, franjas de difração, desfocagem e reflexões).*

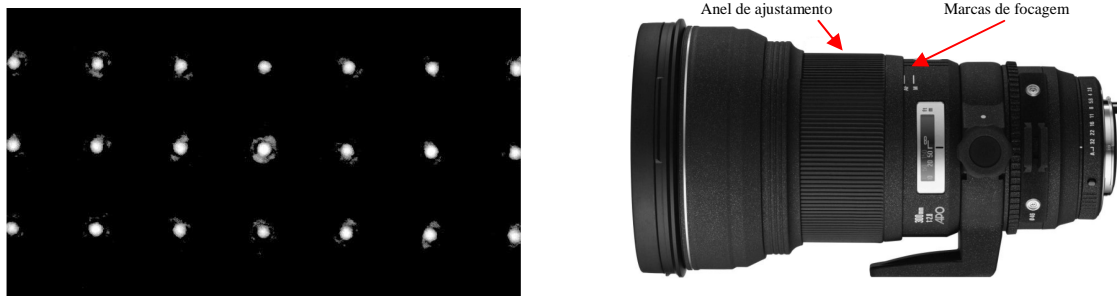
O processamento digital das imagens obtidas, ilustrado na Figura 4.26, incluiu as seguintes etapas, de forma sequencial:

- (i) localização dos centróides dos pontos de difração com recurso a uma operação de *thresholding* para conversão binária, seguida de transformação morfológica de abertura (dilatação após erosão) com elemento estruturante do tipo disco para regularização do contorno do ponto;
- (ii) definição de sub-imagens individuais associadas a cada uma das ordens de difração visíveis, com forma geométrica quadrada em torno dos centróides e com dimensão (30×30) píxeis;
- (iii) determinação dos números digitais e localizações dos máximos das linhas e colunas em cada sub-imagem dos pontos de difração, permitindo identificar a região do máximo do perfil de irradiância;
- (iv) em cada sub-imagem analisada, aplicação de ajuste gaussiano com interpolação sub-píxel entre os máximos das linhas e colunas, seguido de transformação de coordenadas para o sistema adotado na imagem original.



Figura 4.26:Processamento digital de imagem individual da ordem de difração observada (da esq. para a dir.) – imagem original, binária e final com centros geométricos (azul – centróide binário,verde – centróide binário após abertura; vermelho – máximo gaussiano).

A Figura 4.27 mostra uma representação logarítmica do tipo de imagens obtidas no ensaio de parameterização intrínseca do sistema óptico estudado, o qual possui um anel de ajustamento de focagem na respetiva teleobjetiva (*vide* Figura 4.28). Na prática, o referido anel é ajustado para observações a longa distância (infinito) constatando-se que, no caso da objetiva utilizada, não existe um batente mecânico para esta posição mas apenas duas marcações entre as quais se assume existir a melhor posição de focagem no infinito.



Figuras 4.27 e 4.28: Representação logarítmica de uma imagem típica dos pontos de difração (à esq.) e indicação de anel de focagem na teleobjetiva utilizada (à dir.).

Nos trabalhos experimentais realizados foram adquiridas imagens do padrão de difração para três posições distintas de focagem no infinito – posições A (marcação à esquerda), B (posição intermédia) e C (marcação à direita) – de modo a determinar a influência da focagem nas estimativas dos parâmetros intrínsecos. Em acréscimo, foram efetuados cinco ensaios em cada posição de focagem estudada (A, B e C) de modo a ser possível estimar a repetibilidade associada à focagem manual do sistema óptico.

O processo de otimização não-linear desenvolvido teve por objetivo a minimização da seguinte função [Bauer (2008)]

$$\min_m \left\| \begin{bmatrix} x' - u_0 \\ y' - v_0 \end{bmatrix} - f \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \left[1 + K_1 (x^2 + y^2) \right] \right\|^2, \quad (4.1)$$

onde m é o vetor das incógnitas (distância focal – f , coordenadas imagem do ponto principal – u_0 e v_0 , o coeficiente de 1ª ordem da distorção radial – K_1 , os ângulos de Euler relativos à orientação da câmara – ω , φ , κ , e os ângulos de orientação da rede de difração relativamente à câmara – α e β). (x', y') e (x, y) são, respetivamente, as

coordenadas imagem reais (com distorção) e ideais (sem distorção) dos pontos de difração.

Nos Quadros seguintes são apresentados os resultados dos ensaios, nomeadamente, os valores médios e correspondentes desvios padrão experimentais das amostras associados à distância focal (Quadro 4.6), às coordenadas imagem do ponto principal (Quadro 4.7 para a direção x e Quadro 4.8 para a direção y) e ao coeficiente de distorção radial de 1ª ordem (Quadro 4.8).

Quadro 4.6: Estimativas de distância focal (mm).

Ajuste de focagem para ∞	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Valor médio	Desvio padrão
Posição A	597,9	597,7	596,4	598,8	597,2	597,6	0,9
Posição B	607,2	605,6	612,5	600,1	601,0	605,3	5,0
Posição C	591,6	593,2	588,6	592,6	587,8	590,8	2,4

Quadro 4.7: Estimativas de coordenadas do ponto principal na direção x (píxel).

Ajuste de focagem para ∞	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Valor médio	Desvio padrão
Posição A	544,6	545,2	542,3	545,7	544,4	544,4	1,3
Posição B	536,7	534,2	532,5	534,3	531,8	533,9	1,9
Posição C	565,1	564,8	566,7	565,0	568,2	565,9	1,5

Quadro 4.8: Estimativas de coordenadas do ponto principal na direção y (píxel).

Ajuste de focagem para ∞	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Valor médio	Desvio padrão
Posição A	958,4	963,0	960,2	961,4	960,9	960,8	1,7
Posição B	962,9	964,7	964,1	968,5	967,4	965,5	2,3
Posição C	957,4	950,5	956,4	949,9	955,8	954,0	3,5

Quadro 4.9: Estimativas do coeficiente de distorção radial de 1ª ordem ($10^{-6} m^{-2}$).

Ajuste de focagem para ∞	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Valor médio	Desvio padrão
Posição A	9,7	42,6	-2,9	43,1	10,1	20,5	21,0
Posição B	75,0	84,0	93,9	105,0	83,6	88,3	11,5
Posição C	-85,3	-180,2	-64,9	-125,6	-49,1	-101,0	52,7

Os Quadros 4.6 a 4.8 mostram que as estimativas obtidas para os parâmetros intrínsecos distância focal e coordenadas do ponto principal são bastante próximas dos respectivos valores nominais (600 mm, 540 píxeis e 960 píxeis), no entanto, notam-se diferenças entre as posições de ajuste de focagem no infinito.

De facto, os valores médios obtidos para a posição A estão mais próximos dos valores nominais, apresentando desvios padrão mais reduzidos. Para as restantes posições, designadamente, para a posição B, o decréscimo de repetibilidade é justificado pela ausência de batente mecânico e respetiva marcação. Salienta-se, igualmente, o impacto da focagem manual nos resultados obtidos.

No que respeita ao coeficiente de distorção radial de 1ª ordem (Quadro 4.9), é possível observar uma elevada dispersão de valores associados às estimativas (desde $-101,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-2}$ até $20,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-2}$) e aos desvios padrão (entre $11,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-2}$ até $52,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-2}$). Face aos resultados obtidos, a magnitude da distorção é considerada insuficiente para afetar a exatidão associada à localização de pontos na imagem (impacto inferior a 0,01 píxel). Consequentemente, a distorção radial é considerada irrelevante no sistema óptico estudado e pode ser removida do processo de otimização de modo a melhorar a sua estabilidade numérica.

A realização de ensaios complementares, sem contabilização de distorção e segundo diferentes ângulos de orientação da câmara relativamente ao seu eixo óptico (ângulos nominais de 0° e 90°), revelaram resultados idênticos aos mencionados anteriormente.

Tendo como objetivo a determinação das incertezas de medição associadas aos parâmetros intrínsecos, foram realizadas simulações numéricas de Monte Carlo conforme prescrito em [S1-GUM (2008)], dada a natureza não-linear do processo de otimização utilizado na parametrização intrínseca pelo método DOE. Na formulação probabilística das grandezas de entrada, considerou-se um valor constante para a estimativa do comprimento de onda ($633 \cdot 10^{-9} \text{ m}$), adotando-se uma função de distribuição de probabilidade gaussiana para o período espacial associado à rede de difração (centrada em $152,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ com uma incerteza padrão de medição de $0,15 \cdot 10^{-6} \text{ m}$, conforme indicação do seu fabricante). Em relação às coordenadas imagem dos pontos de difração, foram utilizadas as estimativas obtidas para o ensaio 1 e posição A de focagem no infinito, efetuando-se simulações com diversos valores

de incerteza padrão de medição (associadas ao processamento digital de imagem): $\frac{1}{4}p$, $\frac{1}{2}p$ e $\frac{3}{4}p$, em que p representa a dimensão do píxel.

No processo de simulação por um método de Monte Carlo recorreu-se ao gerador de números pseudoaleatórios de Mersenne Twister [Matsumoto (1998)] visando a obtenção de distribuições de probabilidade retangulares, promovendo-se a conversão das sequências geradas para outras distribuições de probabilidade através de algoritmos validados. De modo a assegurar a convergência das sequências numéricas de saída resultantes da combinação das sequências de entrada geradas, foi adotado um processo iterativo no qual o resultado de uma simulação de Monte Carlo atualiza os valores iniciais da otimização não-linear subsequente, conforme ilustrado na Figura 4.29. Salienta-se, igualmente, a utilização de algoritmos validados para ordenação das sequências de saída, obtenção dos percentis do intervalo de confiança e avaliação do nível de exatidão das simulações realizadas, conforme prescrito no [S1- GUM (2008)].

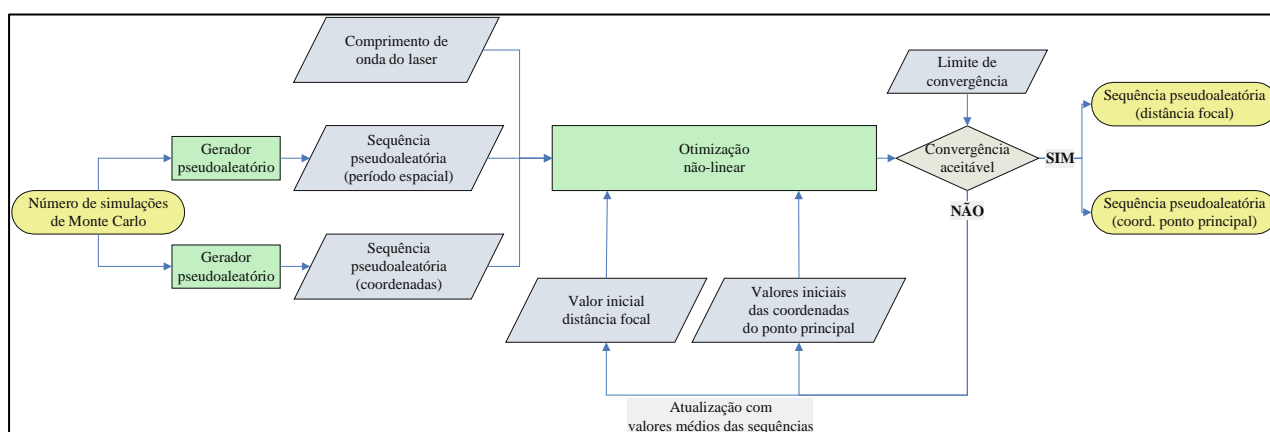


Figura 4.29: Processo iterativo adotado na avaliação de incertezas de medição dos parâmetros intrínsecos.

O Quadro 4.10 resume os resultados obtidos de sequências numéricas com dimensão igual a 10^4 para as quais se obteve um nível de exatidão computacional inferior a 0,1 mm (para a distância focal) e de 0,01 píxel (para as coordenadas do ponto principal). A Figura 4.30 ilustra as funções de densidade de probabilidade normalizadas obtidas por simulações de Monte Carlo com uma incerteza padrão de medição majorada de $\frac{1}{4}p$ associada às coordenadas imagem dos pontos de difração

atendendo ao processamento de imagem efetuado (*vide* secção 3.4.3, em particular, a discussão sobre o nível de exatidão associada ao ajuste de função gaussiana).

Quadro 4.10: Estimativas e incertezas expandidas de medição obtidas por simulação de Monte Carlo.

Incerteza padrão das coordenadas imagem (píxel)	Distância focal		Coordenada x ponto principal		Coordenada y ponto principal	
	Valor médio (mm)	Incerteza expandida 95% (mm)	Valor médio (píxeis)	Incerteza expandida 95% (píxel)	Valor médio (píxeis)	Incerteza expandida 95% (píxel)
0,25	599,95	0,75	545,61	0,06	960,41	0,09
0,50	600,2	1,4	545,60	0,13	960,42	0,15
0,75	600,3	1,9	545,60	0,19	960,44	0,21

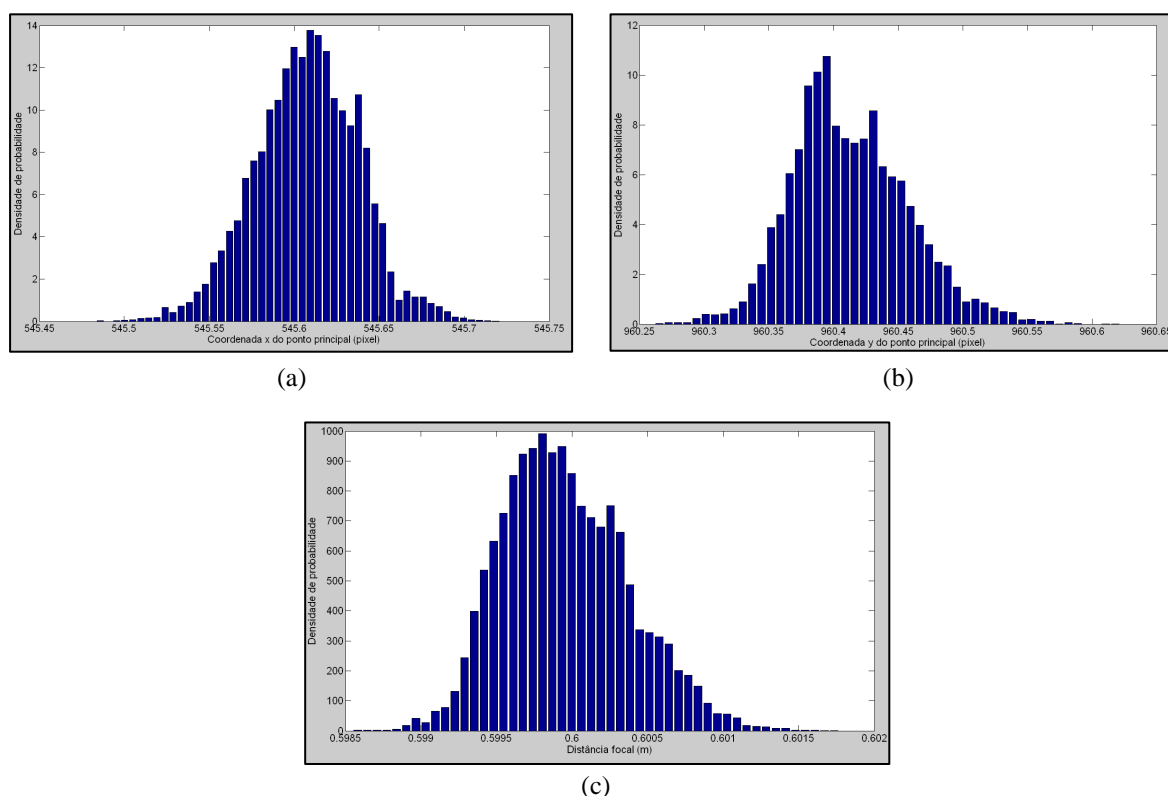


Figura 4.30: Funções densidade de probabilidade normalizadas das grandezas de saída: (a) e (b) coordenadas do ponto principal nas direções x e y , respetivamente; (c) distância focal.

As funções densidade de probabilidades normalizadas obtidas apresentam uma forma próxima da gaussiana, embora ligeiramente assimétricas, sendo possível notar a existência de alguns picos de probabilidade justificados pelo desempenho numérico do processo de otimização. O Quadro 4.11 expõe os coeficientes de correlação obtidos, revelando a existência de efeitos de correlação entre parâmetros intrínsecos que contribuem para a incerteza de medição da posição do centro de projeção da câmara no processo de medição de deslocamento.

Quadro 4.11: Coeficientes de correlação dos parâmetros intrínsecos.

Parâmetros intrínsecos	Distância focal	Coordenada x do ponto principal	Coordenada y do ponto principal
Distância focal	1	-0,28	-0,35
Coordenada x do ponto principal	-0,28	1	-0,25
Coordenada y do ponto principal	-0,35	-0,25	1

4.5 Influência térmica do meio de propagação

4.5.1 Refração atmosférica

Tendo em vista a quantificação do impacto do fenómeno de refração atmosférica, foi promovida a avaliação local de gradientes térmicos em regiões de interesse da P25A, nomeadamente, na fundação da torre sul e na região inferior da viga de rigidez no $\frac{1}{2}$ vão principal. Esta atividade foi concretizada efetuando a medição da temperatura do ar em diferentes posições verticais, com recurso a cinco sensores termohigrométricos distribuídos num perfil vertical com dois metros de altura instalado num tripé, conforme se observa na Figura 4.31, sendo cada sensor protegido da radiação solar direta e difusa através de um escudo de Teflon com ventilação natural.

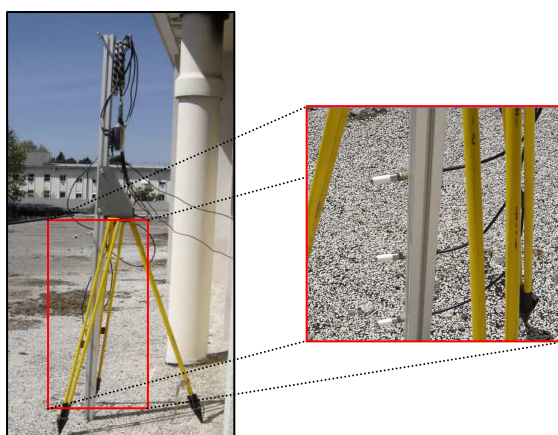


Figura 4.31: Tripé e perfil equipado com sensores termohigrométricos.

Os cinco sensores (com diâmetro de 15 mm e 100 mm de comprimento) correspondem a padrões de trabalho de nível industrial (Rotronic Hygromer[®] IN-1, Pt100 Class A) com ligação a um registador de dados (Rotronic HL-NT2) e a uma estação base de conexão (Rotronic HL-DS-U2). A rastreabilidade a padrões primários

do SI foi assegurada nas gamas de medição de temperatura entre 0 °C e 50 °C e de humidade relativa entre 20% e 95%, sendo obtida uma incerteza de medição instrumental de 0,3 °C em temperatura e de 1,5% em humidade relativa.

Dois perfis instrumentados foram preparados para a realização de ensaios de campo na P25A, com distribuição vertical de sensores individualizada, de acordo com a região de instalação. Para o perfil instrumentado instalado na fundação da torre sul, as distâncias verticais entre sensores e o topo da superfície foram: 0,01 m; 0,25 m; 0,50 m; 1,0 m; 1,99 m. As mesmas distâncias foram estabelecidas para o perfil instrumentado no ½ vão principal mas, neste caso, relativamente à superfície inferior da viga de rigidez. A Figura 4.32 mostra as regiões de instalação dos perfis instrumentados na fundação da torre sul e no ½ vão principal da P25A. Após a instalação completa de cada perfil de medição, foi definido um período de aquisição de uma hora de duração com frequência de aquisição de um minuto.

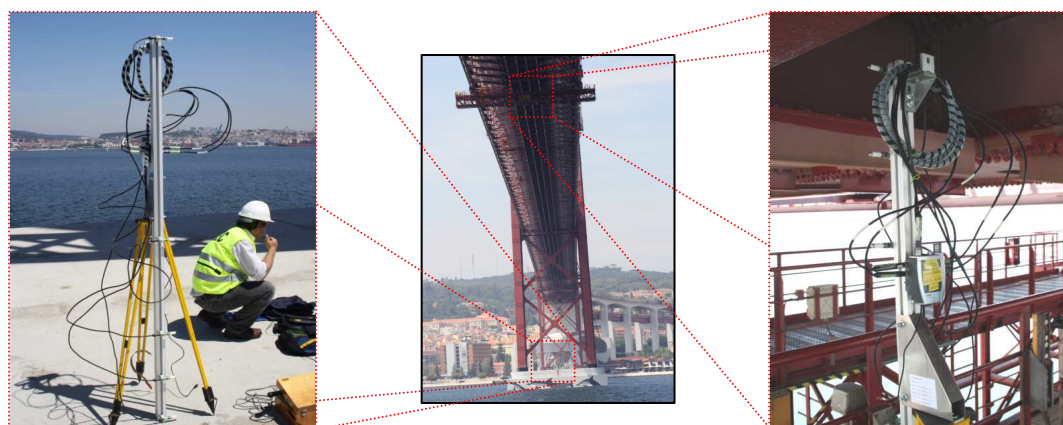
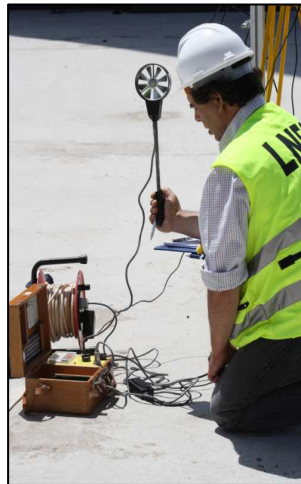


Figura 4.32: Regiões de medição termohigrométrica na fundação da torre (à esq.) e no ½ vão principal (à dir.).

Comparativamente com estas medições efetuou-se a medição da velocidade do vento com um período de aquisição equivalente, tornando possível correlacionar ambas as medições. Na concretização desta tarefa foram utilizados anemómetros rastreados (*vide* Figuras 4.33 e 4.34): (i) medição na fundação da torre sul – anemómetro analógico de turbina (Airflow / SN 25947) com quatro gamas de medição ($0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) e divisão de $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ para velocidades do vento reduzidas (inferiores a $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) ou de $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ para valores superiores; (ii) anemómetro digital de turbina

(Omega / HHF300A) com gama de medição compreendida entre $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ – $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e resolução de $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Figuras 4.33 e 4.34: Medições da velocidade do vento na fundação da torre sul (à esq.) e no 1/2 vão principal (à dir.).

Nas Figuras seguintes são apresentados os registos temporais das medições das grandezas de influência mencionadas (registos obtidos a 6 de junho de 2013 nas duas regiões de interesse na P25A – no 1/2 vão principal – Figuras 4.35 a 4.37 – e na fundação da torre sul – Figuras 4.38 a 4.40).

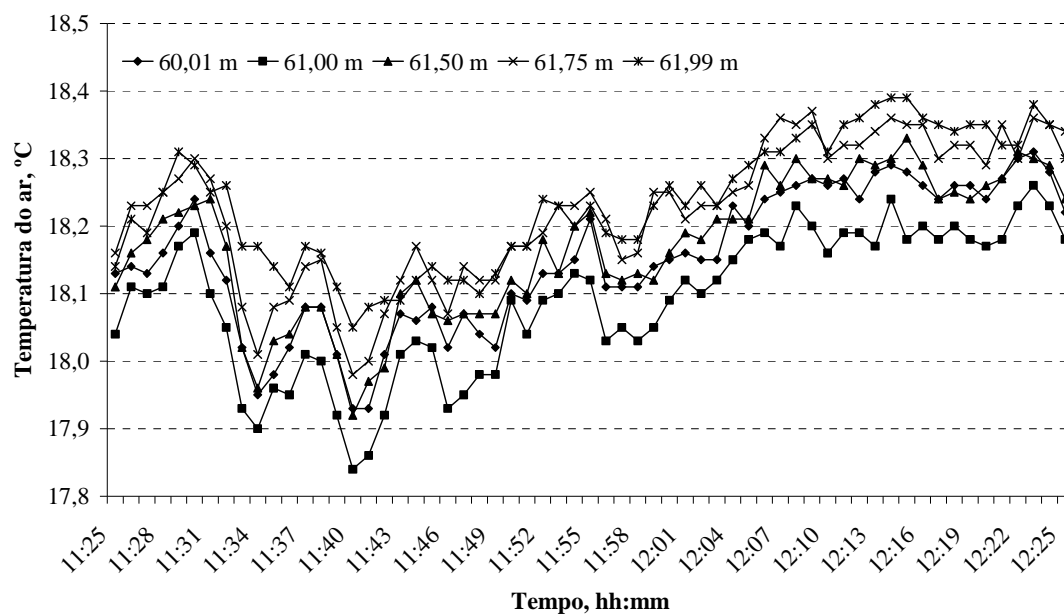


Figura 4.35: Registo temporal da temperatura do ar no 1/2 vão principal.

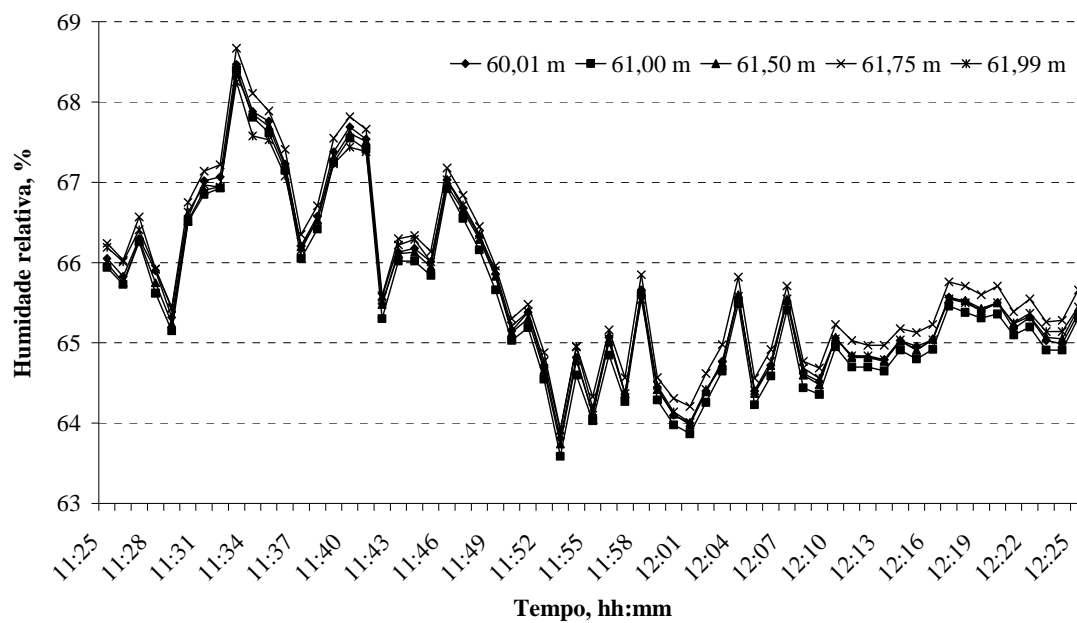


Figura 4.36: Registo temporal da humidade relativa do ar no 1/2 vão principal.

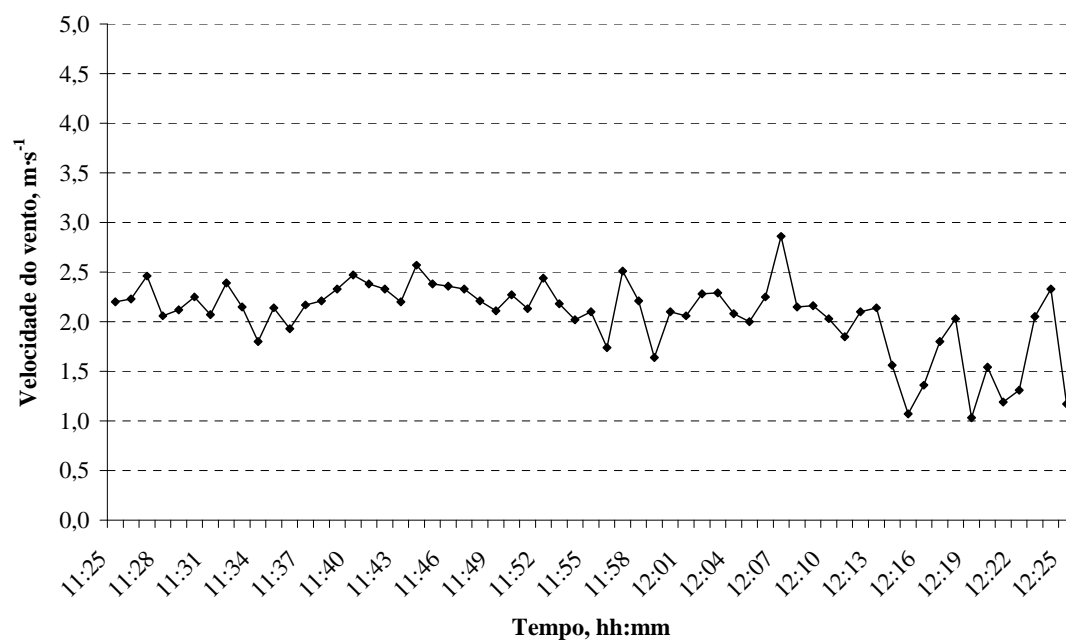


Figura 4.37: Registo temporal da velocidade do vento no 1/2 vão principal.

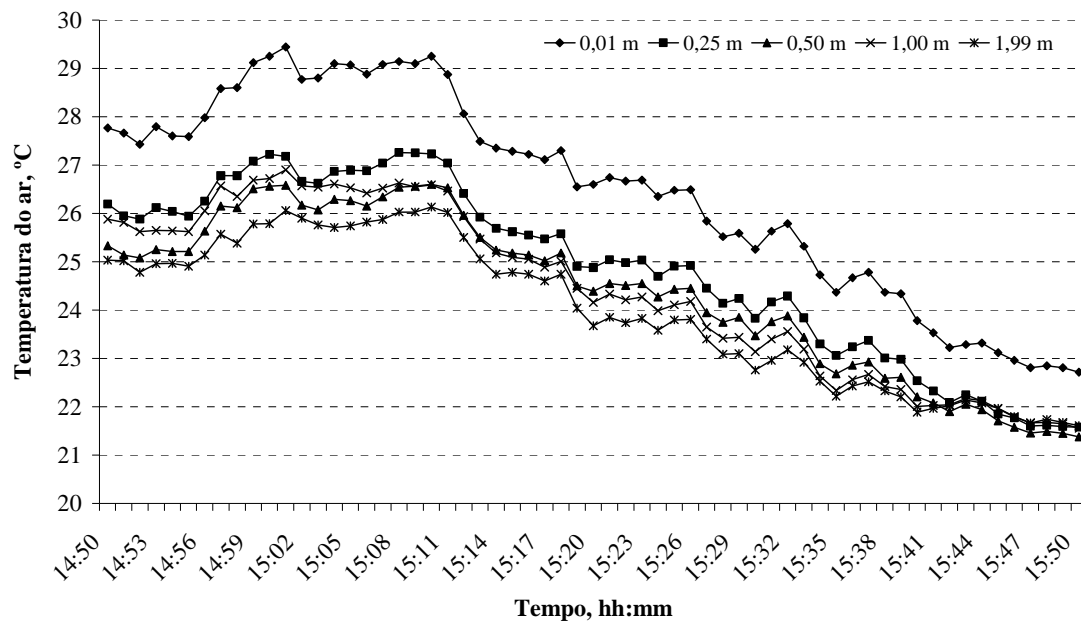


Figura 4.38: Registo temporal da temperatura do ar na fundação da torre sul.

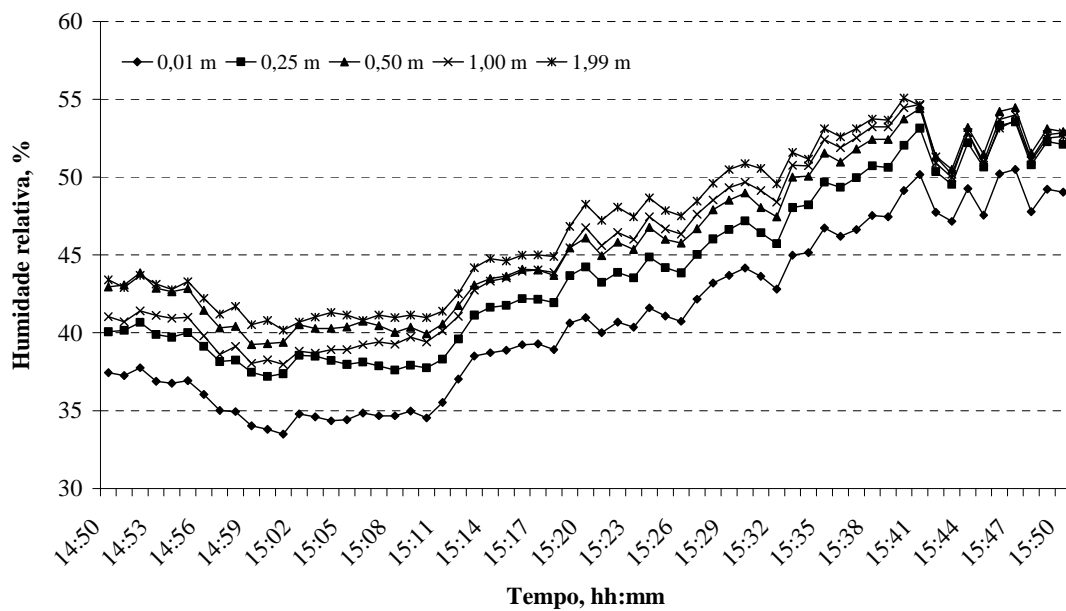


Figura 4.39: Registo temporal da humidade relativa do ar na fundação da torre sul.

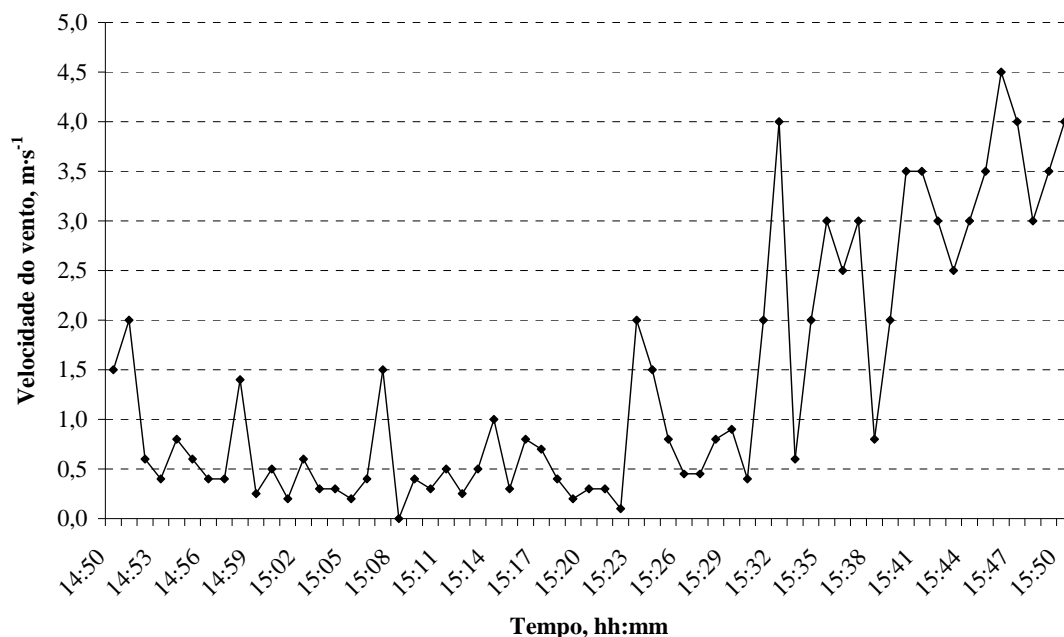


Figura 4.40: Registro temporal da velocidade do vento na fundação da torre sul.

Os resultados apresentados anteriormente suportam as seguintes observações:

(i) **½ vão principal**

a) os valores mais elevados da temperatura do ar verificaram-se junto à região mais próxima da superfície inferior da viga de rigidez (por motivo de transmissão de calor por radiação da ponte para o ar e pelo reduzido efeito de convecção em virtude da baixa velocidade do vento nesta região);

b) a evolução temporal da humidade relativa do ar foi oposta à evolução da temperatura do ar (os valores mais elevados de humidade relativa correspondem aos valores mais reduzidos de temperatura do ar e reciprocamente);

c) a evolução temporal da velocidade do vento foi caracterizada por comportamento estável até às 12:10; a partir desse momento, a velocidade do vento decresceu para valores mais reduzidos e o correspondente efeito de convecção é observado na estabilização dos perfis termohigrométricos; durante o período de observação, a direcção do vento permaneceu, aproximadamente, constante na direcção sudoeste-oeste; as medições apresentadas dizem respeito à zona central da superfície inferior da viga de rigidez (local de instalação da câmara) e não à zona lateral onde a incidência

do vento se manifesta de uma forma mais intensa, originando valores de velocidade do vento, em regra, de amplitude duas vezes superior.

(ii) **fundação da torre sul:**

a) por motivo de transmissão de calor por efeito de radiação do topo da superfície da fundação (aquecida pela radiação solar incidente), os valores mais elevados de temperatura do ar foram registados para a posição vertical mais próxima da superfície (0,01 m) salientando que, para as restantes posições verticais, as diferenças de temperatura do ar entre posições consecutivas apresentaram uma reduzida magnitude quando comparadas com a diferença de temperatura do ar entre as posições 0,01 m e 0,25 m;

b) tal como se tinha constatado nas medições realizadas no ½ vão principal, a evolução temporal higrométrica foi oposta à evolução da temperatura do ar (uma diminuição da temperatura do ar corresponde a um aumento da humidade relativa e reciprocamente);

c) foi observada uma diferença de magnitude entre os valores iniciais e finais da velocidade do vento justificada pela variação da direção do vento de oeste para noroeste (próximo das 15:32) salientando que o anemómetro estava alinhado com a torre na direção oeste, sendo mais exposta a outras direções do vento, nomeadamente, o vento noroeste; esta modificação na direção do vento pode ser notada nos registos termohigrométricos visto que a diferença relativa entre posições verticais de medição consecutivas decresceu, tornando-se quase nula devido ao efeito convectivo do vento, com exceção da posição vertical mais próxima da superfície onde o efeito de radiação prevaleceu;

(iii) uma **análise comparativa entre as duas regiões** observadas mostra que a região inferior do vão principal possui uma variabilidade espacial e temporal térmica reduzida quando comparada com a fundação da torre em resultado das diferentes condições de exposição salientando-se que, durante o período diurno, a superfície inferior da viga de rigidez está protegida da exposição solar direta e ação do vento; em ambas as regiões e considerando todas as posições verticais estudadas, a temperatura do ar e a humidade relativa mostraram uma resposta similar a alterações ambientais, variando de forma idêntica.

As estimativas de medição apresentadas anteriormente permitiram determinar a correspondente distribuição temporal e espacial de estimativas do índice de refração no ½ vão principal e na fundação da torre sul. As Figuras 4.41 a 4.46 constituem representações gráficas das distribuições verticais térmica, higrométrica e do índice de refração para os instantes de tempo e para as regiões espaciais estudadas.

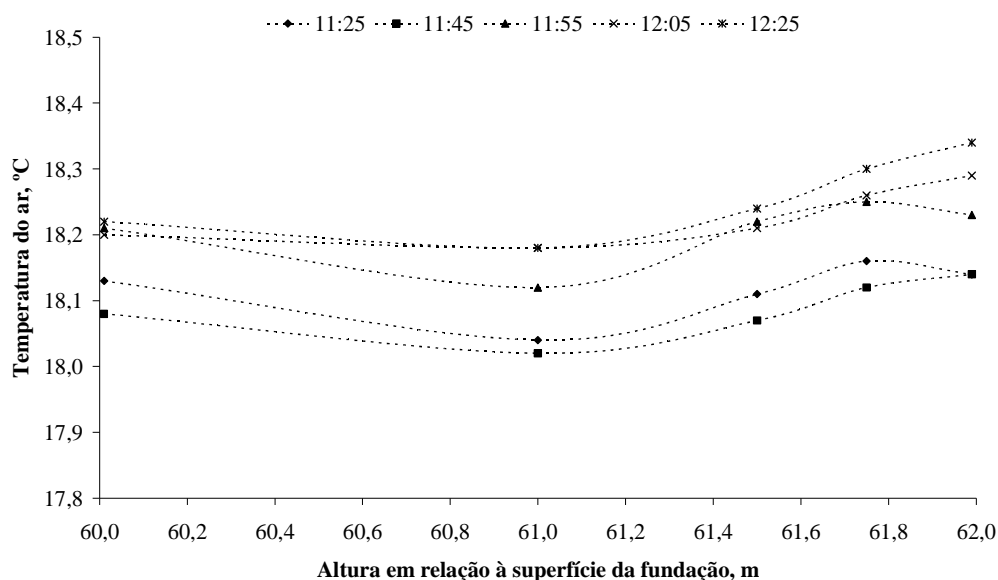


Figura 4.41: Distribuição vertical da temperatura do ar no ½ vão principal.

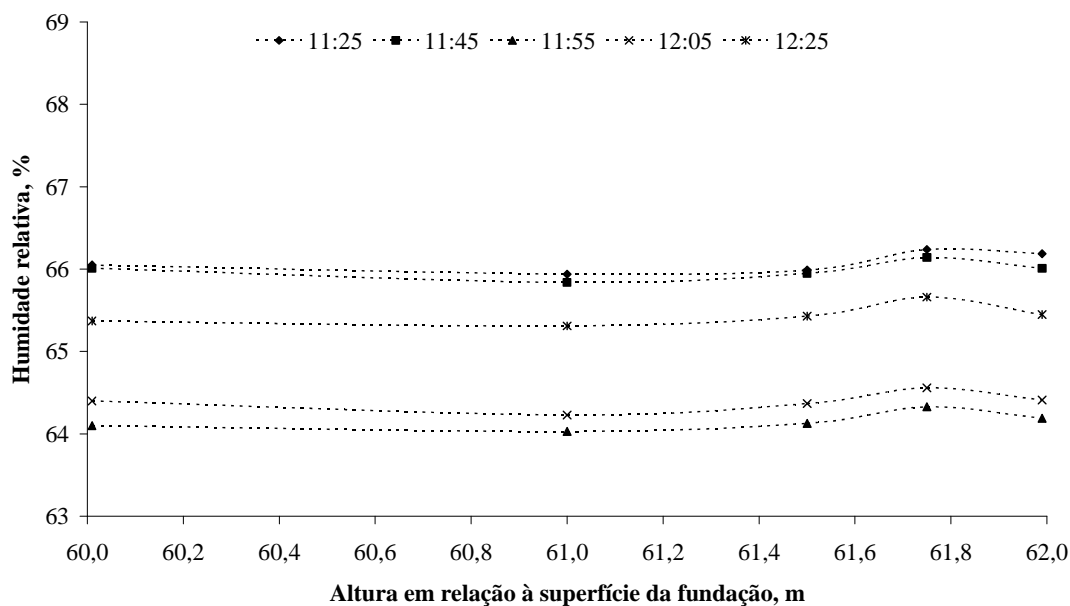


Figura 4.42: Distribuição vertical da humidade relativa do ar no ½ vão principal.

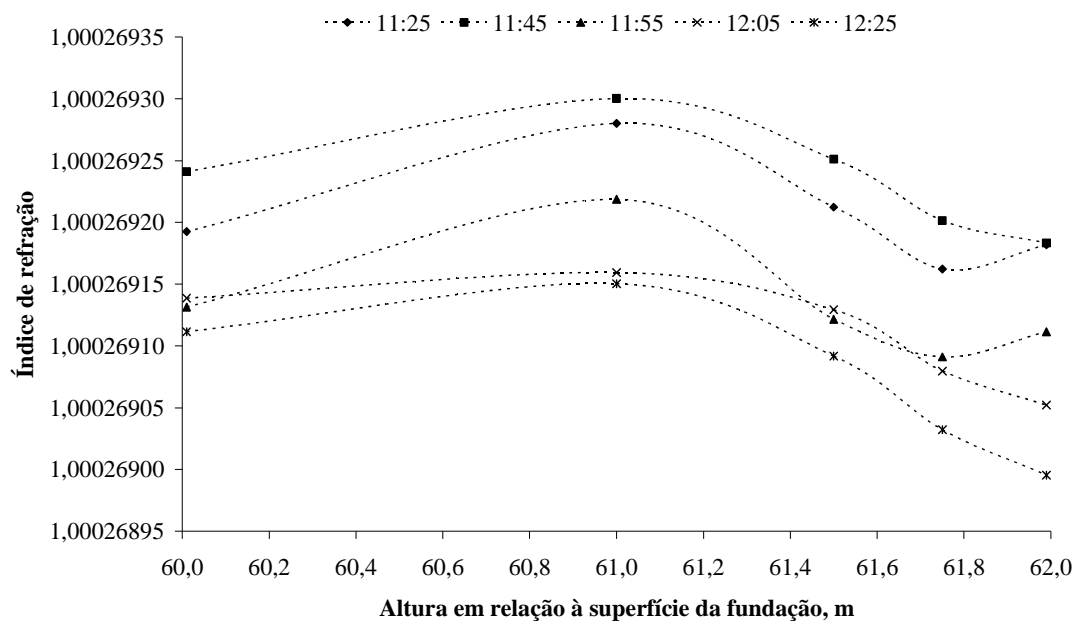


Figura 4.43: Distribuição vertical do índice de refração no 1/2 vão principal.

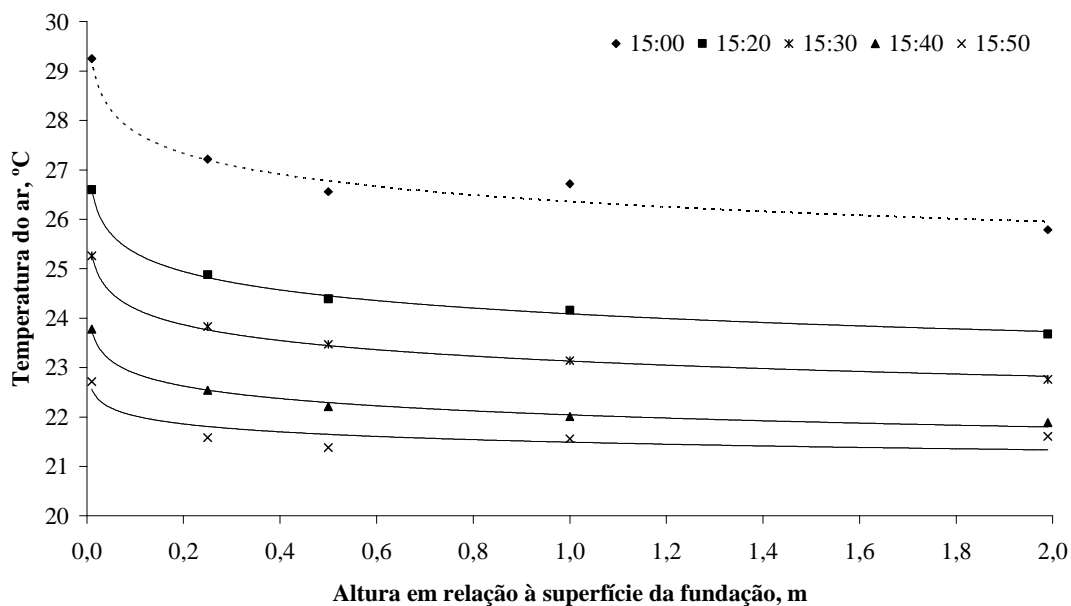


Figura 4.44: Distribuição vertical da temperatura do ar na fundação da torre sul.

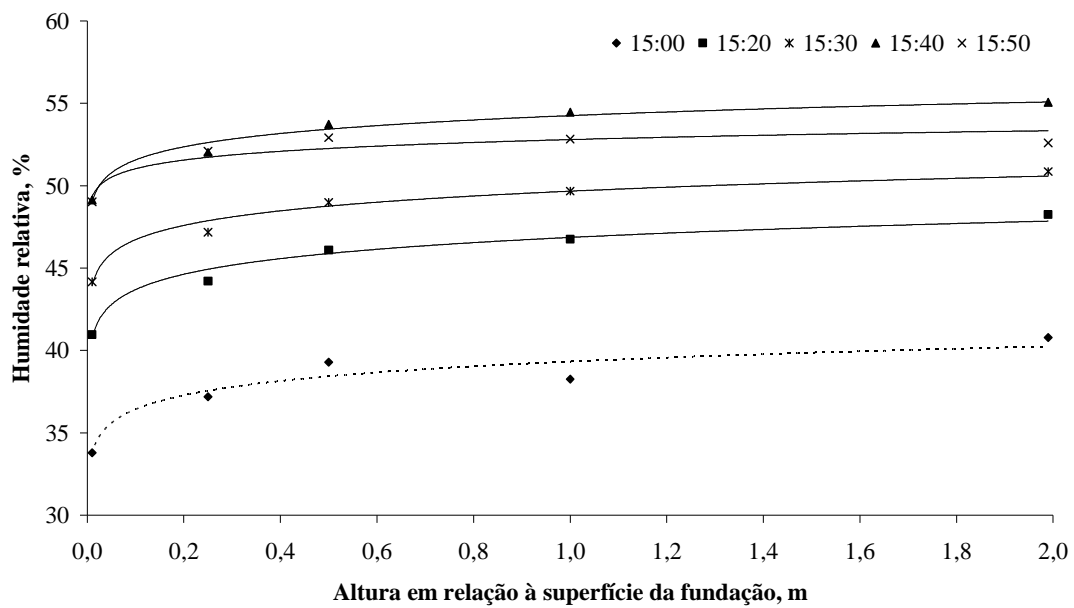


Figura 4.45: Distribuição vertical da umidade relativa na fundação da torre sul.

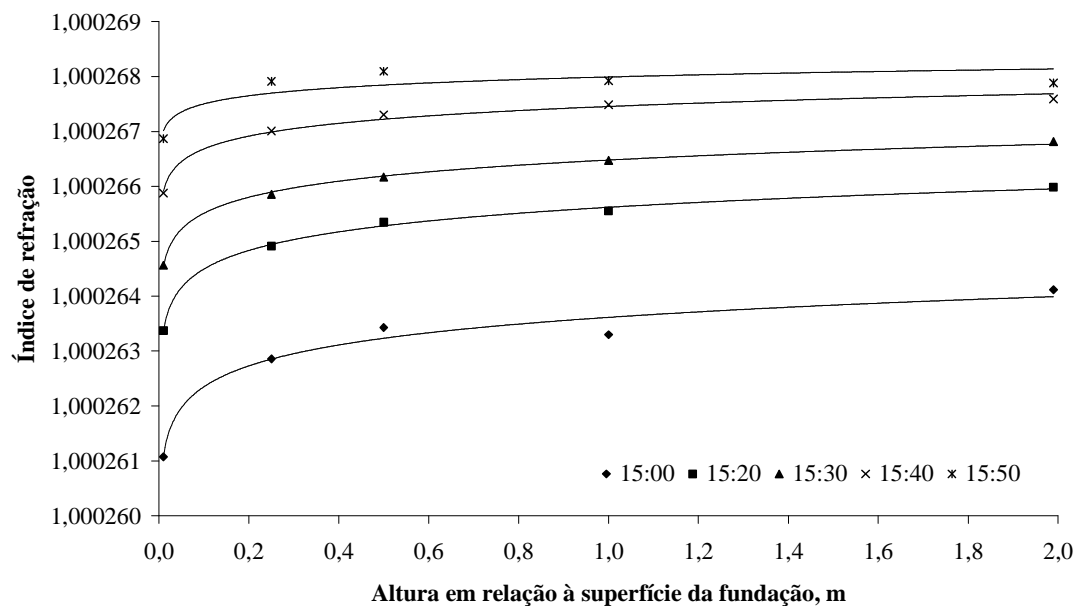


Figura 4.46 Distribuição vertical do índice de refração na fundação da torre sul.

Com base nos resultados apresentados, é possível realizar as seguintes observações:

(i) **½ vão principal:**

a) a distribuição térmica vertical na região inferior da viga de rigidez apresentou, em regra, um decréscimo linear da temperatura para uma gama de altura compreendida entre 61 m e 62 m (gradiente térmico vertical aproximadamente constante), embora se note um comportamento não-linear junto à superfície da viga de rigidez em virtude de efeitos de transmissão de calor de natureza convectiva e radiante; na região compreendida entre 60 m e 61 m, salienta-se um ligeiro aumento da temperatura atribuído à presença da plataforma móvel onde o perfil instrumentado foi instalado por debaixo da viga de rigidez;

b) a representação gráfica da distribuição vertical dos valores de humidade relativa mostrou níveis constantes de humidade na gama de 60 m até 62 m durante o período de observação; deste modo, um gradiente vertical higrométrico nulo pode ser assumido para esta região;

c) o cálculo da evolução temporal e espacial do índice de refração na proximidade da região inferior da viga de rigidez refletiu uma influência significativa do comportamento térmico anteriormente descrito, mostrando um aumento linear (gradiente vertical constante de, aproximadamente, -10^{-7} m^{-1}) com o decréscimo em altura na gama entre 61 m e 62 m; na restante gama de altura, é observado um ligeiro decréscimo do índice de refração (em torno de $5 \cdot 10^{-8}$) como resultado da influência térmica da plataforma móvel instalada por debaixo da viga de rigidez.

(ii) **fundação da torre sul:**

a) a observação desta região revelou uma relação não-linear entre a temperatura do ar e a altura relativa ao topo da superfície da fundação, onde se constatou uma diminuição da temperatura, t , com o aumento da altura, Y , na qual o modelo de potência³ com parâmetros a e b dado por,

$$t(Y) = a \cdot Y^b, \quad (4.2)$$

³ Com designação anglo-saxónica alternativa de *power law model*.

revela um bom ajustamento aos dados experimentais, nomeadamente, para o período de observação compreendido entre as 15:20 e 15:40 (*vide* Quadro 4.12), dando origem a um gradiente térmico vertical não-linear dado por

$$\frac{dt}{dY} = a \cdot b \cdot Y^{b-1}, \quad (4.3)$$

representado graficamente na Figura 4.47.

Quadro 4.12: Modelo paramétrico de potência da distribuição vertical da temperatura do ar na fundação da torre sul em 2013-06-05.

<i>t</i> (hh:mm)	<i>a</i>	<i>b</i>	Resíduo máximo
15:00	26,360 °C·m ^{0,022 6}	-2,26·10 ⁻²	0,36 °C
15:20	24,087 °C·m ^{0,021 7}	-2,17·10 ⁻²	0,07 °C
15:30	23,131 °C·m ^{0,019 4}	-1,94·10 ⁻²	0,07 °C
15:40	22,043 °C·m ^{0,016 2}	-1,62·10 ⁻²	0,09 °C
15:50	21,491 °C·m ^{0,010 6}	-1,06·10 ⁻²	0,28 °C

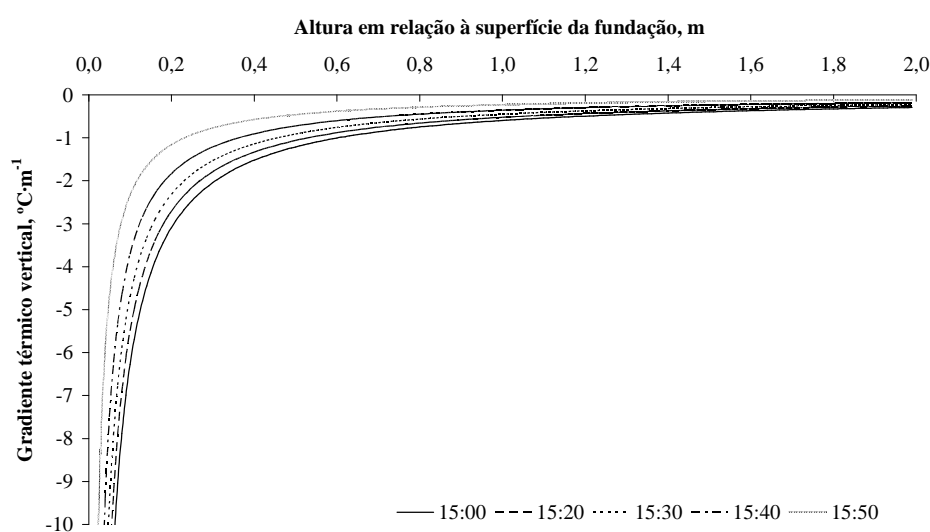


Figura 4.47: Gradiente térmico vertical da temperatura do ar na superfície de topo da fundação da torre sul (2013-06-05).

b) a distribuição espacial vertical das medições de humidade relativa também apresentam uma relação não-linear relativamente à altura em relação à superfície de topo da fundação, sendo oposta à distribuição da temperatura do ar, isto é, um aumento de altura corresponde a um aumento de humidade relativa; novamente, o modelo paramétrico de potência

$$hr(Y) = a \cdot Y^b, \quad (4.4)$$

permite um ajuste apropriado aos dados experimentais, nomeadamente, para o período de tempo de observação compreendido entre 15:20 e 15:50, conforme ilustrado no Quadro 4.13.

Quadro 4.13: Modelo paramétrico de potência da distribuição vertical da humidade relativa na fundação da torre sul em 2013-06-05 .

<i>t</i> (hh:mm)	<i>a</i>	<i>b</i>	Resíduo máximo
15:00	39,336 % · m ^{-0,033 3}	3,33 · 10 ⁻²	1,1%
15:20	46,867 % · m ^{-0,030 4}	3,04 · 10 ⁻²	0,7%
15:30	49,674 % · m ^{-0,026 5}	2,65 · 10 ⁻²	0,7%
15:40	54,262 % · m ^{-0,022 1}	2,21 · 10 ⁻²	0,6%
15:50	52,805 % · m ^{-0,014 8}	1,48 · 10 ⁻²	0,7%

c) como consequência da distribuição vertical termohigrométrica não-linear, o índice de refração do ar húmido na fundação da torre sul também reflete uma relação não-linear, aumentando com a altura em relação ao topo da superfície, nomeadamente, na gama de altura compreendida entre 0,01 m e 0,50 m; o Quadro 4.14 apresenta as estimativas dos parâmetros do modelo de potência associado ao índice de refração,

$$n(Y) = a \cdot Z^b, \quad (4.5)$$

para o qual o gradiente vertical corresponde a

$$\frac{dn}{dY} = a \cdot b \cdot Y^{b-1}, \quad (4.6)$$

representado na Figura 4.48.

Quadro 4.14: Modelo paramétrico de potência do índice de refração vertical na fundação da torre sul em 2013-06-05 .

<i>t</i> (hh:mm)	<i>a</i>	<i>b</i>	Resíduo máximo
15:00	1,000 263 614 m ^{-5,49·10⁻⁷}	5,49 · 10 ⁻⁷	3,15 · 10 ⁻⁷
15:20	1,000 265 619 m ^{-4,88·10⁻⁷}	4,88 · 10 ⁻⁷	0,67 · 10 ⁻⁷
15:30	1,000 266 479 m ^{-4,21·10⁻⁷}	4,21 · 10 ⁻⁷	0,46 · 10 ⁻⁷
15:40	1,000 267 455 m ^{-3,35·10⁻⁷}	3,35 · 10 ⁻⁷	0,95 · 10 ⁻⁷
15:50	1,000 267 992 m ^{-2,13·10⁻⁷}	2,13 · 10 ⁻⁷	2,59 · 10 ⁻⁷

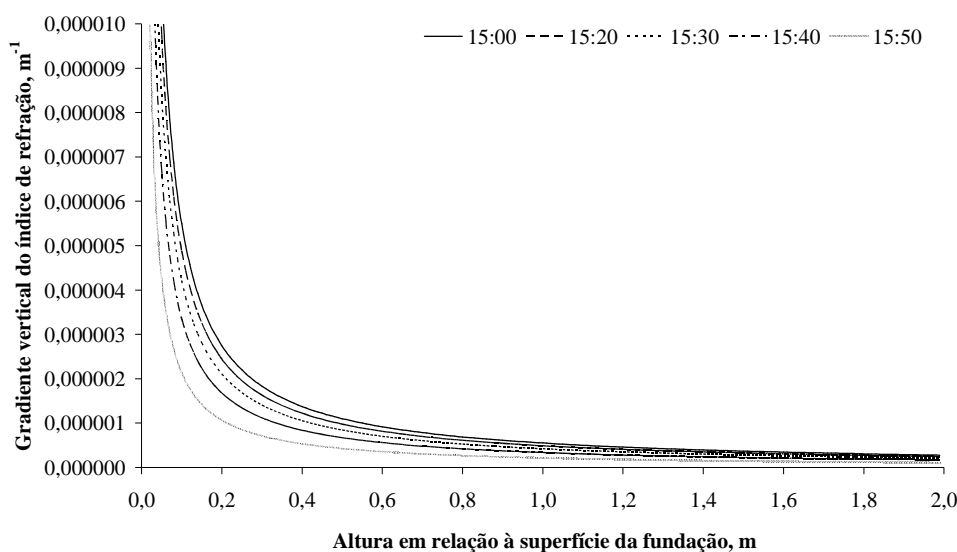


Figura 4.48: Gradiente vertical do índice de refração na superfície de topo da fundação da torre sul (2013-06-05).

- (iii) uma **análise comparativa** dos registos de medição não-simultâneos (com uma diferença de 2,5 horas entre registos associados às duas regiões estudadas) revela que a fundação da torre sul é caracterizada por um gradiente térmico vertical não-linear de magnitude elevada quando comparado com a região inferior da viga de rigidez, a qual não está exposta a radiação solar direta durante o período diurno por efeito da sombra da viga de rigidez; este facto é refletido no gradiente higrométrico observado e no correspondente índice de refração que também assume uma relação não-linear na proximidade da fundação; considerando a magnitude das variações verticais do índice de refração na superfície inferior da viga de rigidez (na gama entre 61 m e 62 m), esta região exibiu um comportamento linear quando comparado com a região da fundação.

Medições simultâneas da temperatura do ar, humidade relativa e velocidade do vento foram realizadas na fundação da torre sul e na região inferior da viga de rigidez próximo da ancoragem sul (em 2013-07-09) durante a realização de ensaios de avaliação do efeito de feixe errante por turbulência atmosférica e de calibração *in situ* do sistema de medição, permitindo avaliar o índice de refração a diferentes alturas verticais (respetivamente, 0,5 m e 61 m). Os registos ambientais obtidos são apresentados nas Figuras 4.49 a 4.51 enquanto que a Figura 4.52 mostra o

correspondente índice de refração calculado para um comprimento de onda de 875 nm associado aos LEDs constituintes dos alvos. A pressão atmosférica permaneceu estável durante os registos experimentais, nomeadamente, na fundação da torre sul (1015 hPa) e na ancoragem sul (1008 hPa).

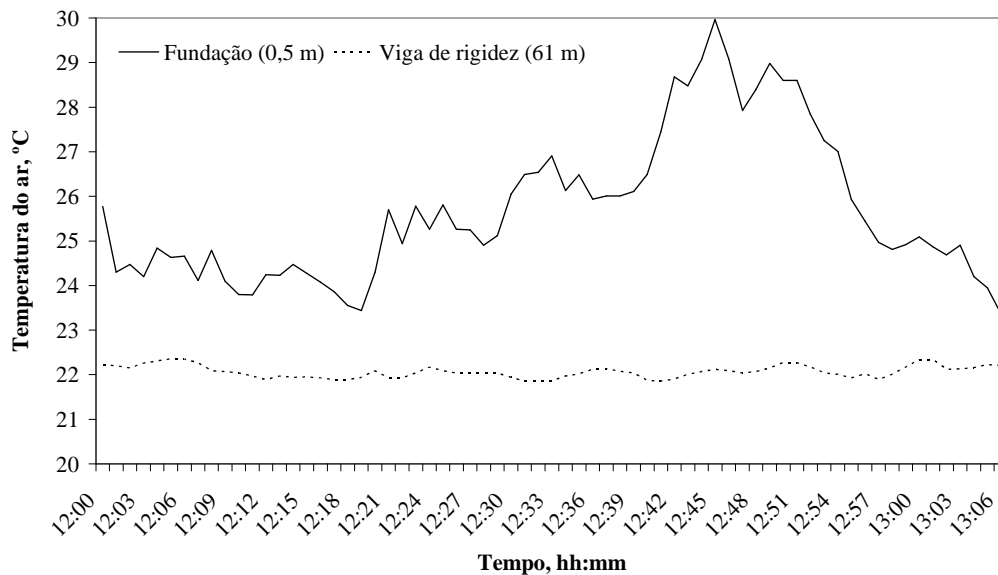


Figura 4.49: Registo temporal da temperatura do ar (2013-07-09).

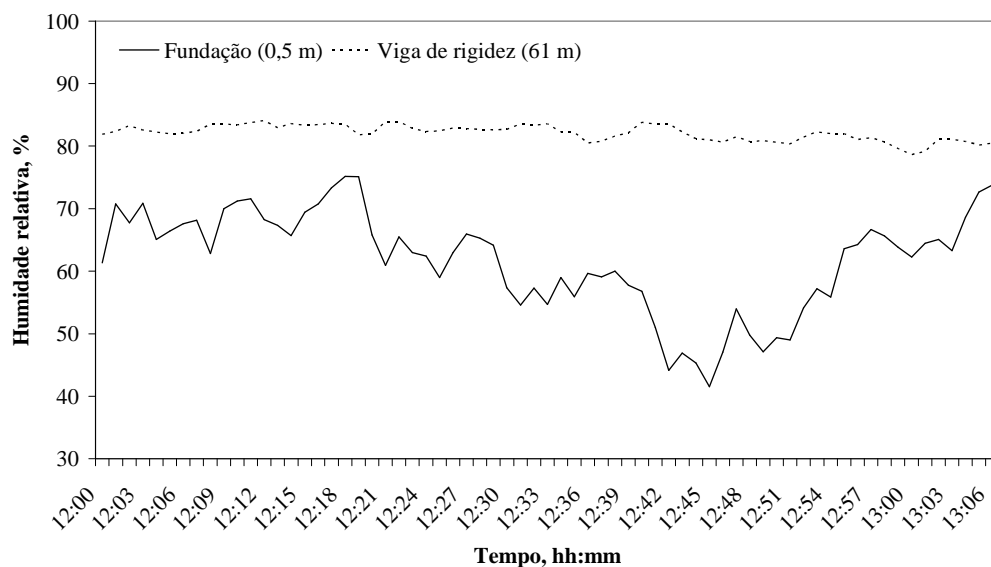


Figura 4.50: Registo temporal de humidade relativa (2013-07-09).

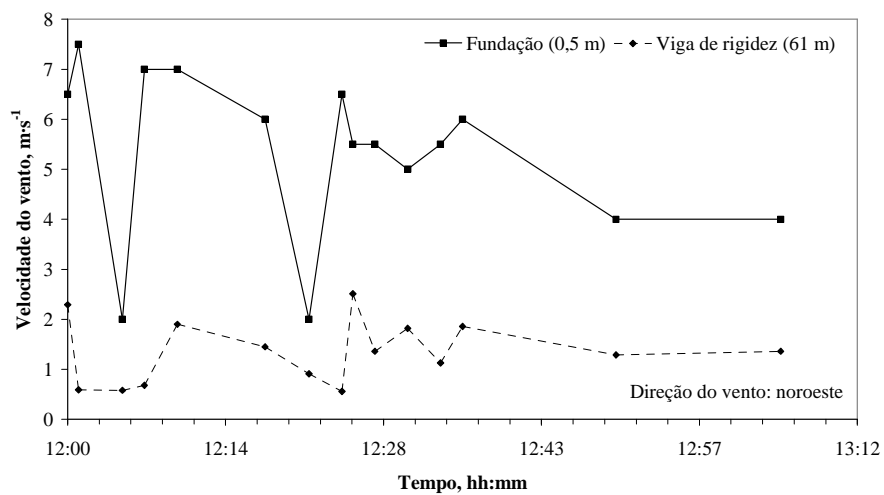


Figura 4.51: Registro temporal da velocidade do vento (2013-07-09).

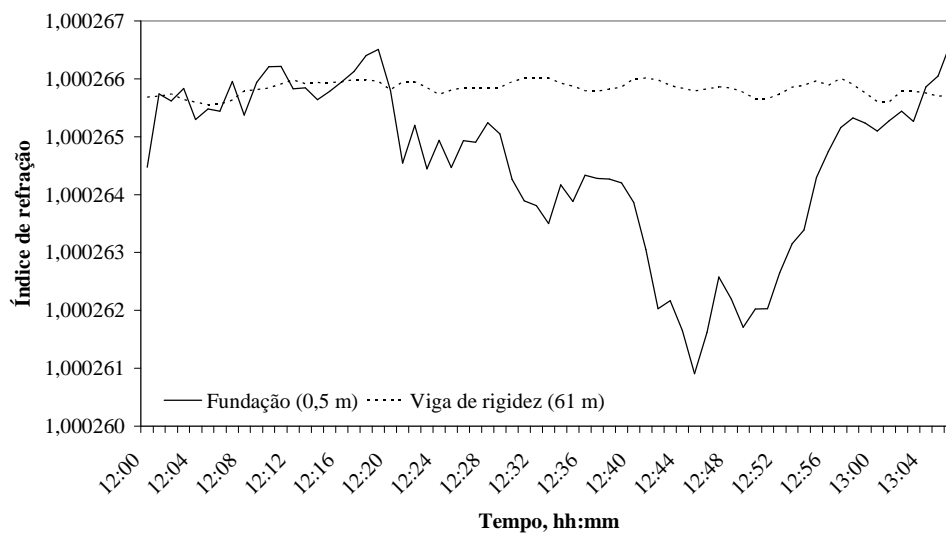


Figura 5.52: Evolução temporal do índice de refração calculado (2013-07-09).

As medições térmicas revelaram diferenças de temperatura do ar entre a região da fundação e a região inferior da viga de rigidez que variam entre um valor mínimo de, aproximadamente, $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, alcançando uma diferença máxima próxima de $7,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Durante o período de tempo de observação, a temperatura do ar na proximidade da viga de rigidez permaneceu estável enquanto que na fundação, foi observado um aumento de temperatura entre as 12:20 e 12:45. Em seguida, a temperatura do ar começou a decrescer, sobretudo, devido ao efeito de sombra da torre na superfície de topo da fundação.

Os registos higrométricos simultâneos também mostram que a região da viga de rigidez apresentou maior estabilidade (com humidade relativa ligeiramente acima de 80%) quando comparada com o comportamento higrométrico próximo da fundação, onde valores mais reduzidos foram obtidos. A diferença de humidade relativa entre as duas regiões estudadas variou entre 7% e 40%. Durante o período de observação, foram registados valores de velocidade do vento mais elevados na fundação da torre sul (velocidade média do vento de $5,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) quando comparado com o registo associado à viga de rigidez (velocidade média do vento de $1,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), considerando a direção noroeste do vento em ambas as regiões.

A evolução temporal dos índices de refração em ambas as regiões de observação mostrou diferenças pouco significativas no período entre as 12:00 e 12:20, mesmo considerando diferenças de temperatura do ar e humidade relativa próximas de 2°C e 10%, respetivamente. Este facto é justificado pela diferença barométrica entre a fundação (onde as medições foram realizadas numa posição vertical de 0,5 m) e a região inferior da viga de rigidez (numa posição vertical nominal de 61 m). Após as 12:20, a temperatura do ar aumentou na fundação com impacto no correspondente índice de refração, alcançando às 12:45 uma diferença máxima de, aproximadamente, $5\cdot 10^{-6}$ entre as duas regiões estudadas, retornando em seguida à situação inicial.

O método do gradiente de índice de refração constante (descrito na secção 3.6.3) pode ser aplicado, numa primeira aproximação linear [Aikada (2009)], na quantificação do ângulo e do desvio de refração vertical em duas situações de interesse: uma diferença menor entre índices de refração considerando, por exemplo, as condições observadas às 12:15; e uma diferença maior entre índices de refração, tomando em conta as condições de observação às 12:45. As estimativas das principais grandezas de entrada e saída são apresentadas nos Quadros 4.15 e 4.16.

Quadro 4.15: Ângulos e desvios de refração vertical obtidos pela abordagem do gradiente de índice de refração constante (2013-07-09 às 12:15).

Grandezas	Z	Y	ε	t	hr	p_{atm}	n
Fundação torre sul	0 m	0,5 m	105,279 mrad	24,27 °C	69,39%	1015 hPa	1,000 265 785
Viga de rigidez	582 m	61 m		21,95 °C	83,34%	1008 hPa	1,000 265 930
n_0	1,000 265 784						
α	$2,4\cdot 10^{-9} \text{ m}^{-1}$						
δ	-0,6 μrad						
ΔY	-0,4 mm						

Quadro 4.16: Ângulos e desvios de refração vertical obtidos pela abordagem do gradiente de índice de refração constante (2013-07-09 às 12:45).

Grandezas	Z	Y	ε	t	hr	p_{atm}	n
Fundação torre sul	0 m	0,5 m	105,279 mrad	29,96 °C	41,53%	1015 hPa	1,000 260 905
Viga de rigidez	582 m	61 m		22,12 °C	81,01%	1008 hPa	1,000 265 792
n_0	1,000 260 866						
α	$79,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^{-1}$						
δ	-23,4 μrad						
ΔY	-13,6 mm						

A análise dos resultados expostos nos Quadros 4.15 e 4.16 revelou uma diferença significativa entre estimativas dos ângulos e desvios de refração vertical, obtidos para os dois instantes de tempo estudados. No primeiro instante de tempo analisado (Quadro 4.15), o gradiente vertical do índice de refração apresentou uma magnitude reduzida ($2,4 \cdot 10^{-9} \text{ m}^{-1}$) originado um baixo ângulo de refração vertical e, conseqüentemente, um desvio vertical mínimo por efeito de refração (-0,4 mm). No segundo instante de tempo observado (12:45), a magnitude elevada do gradiente térmico vertical entre a fundação e a viga de rigidez, é refletida num gradiente vertical de índice de refração mais elevado ($79,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^{-1}$) quando comparado com o instante de tempo anterior (12:15). Deste modo, o ângulo e o desvio de refração vertical não podem ser desprezados na avaliação da exatidão dimensional do sistema de medição.

Em complemento à abordagem do gradiente constante, os ângulos e desvios de refração vertical mencionados anteriormente também podem ser determinados usando a abordagem geodésica referida na secção 3.6.3, utilizando os mesmos valores dos gradientes verticais de índice de refração associados aos instantes de tempo. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 4.17.

Quadro 4.17: Comparação de ângulos e desvios de refração vertical obtidos por diferentes abordagens (2013-07-09).

t (hh:mm)	12:15		12:45	
Grandeza	δ (μrad)	ΔY (mm)	δ (μrad)	ΔY (mm)
Abordagem do gradiente constante	-0,6	-0,4	-23,4	-13,6
Abordagem geodésica	-0,7	-0,4	-23,1	-13,5

O Quadro anterior mostra que existem diferenças reduzidas entre os resultados obtidos em ambas as abordagens, considerando a inexistência de efeitos não-lineares

no gradiente vertical do índice de refração. Contudo, os resultados obtidos para a fundação da torre sul mostraram que, em determinados cenários de observação, um significativo ambiente térmico não-linear pode ser observado junto à sua superfície de topo, requerendo a quantificação destes efeitos nos desvios de refração vertical. Visto que a abordagem geodésica permite considerar a existência de efeitos não-lineares na região inicial da trajetória da luz, foi efetuada a sua aplicação na estimação de desvios de refração vertical com base nos modelos paramétricos não-lineares obtidos para o índice de refração (*vide* Quadro 4.14 e Figura 4.48). Estes modelos foram utilizados para determinar o índice de refração e o seu gradiente nas posições inicial e intermédia da trajetória da luz. As Figuras 4.53 e 4.54 representam, respetivamente, a evolução dos ângulos e desvios na posição vertical dos alvos compreendida entre 0,10 m e 1,99 m relativamente à superfície de topo na fundação da torre sul.

Estas Figuras permitem mostrar a relevância do fenómeno de refração na exatidão do sistema, visto que significativos ângulos e desvios de refração vertical (acima de 12 μrad e -7 mm, respetivamente) são esperados em condições adversas de observação. No intervalo de tempo de observação estudado e considerando, por exemplo, que os alvos estão colocados numa posição vertical de 0,5 m relativamente à superfície de topo da fundação, os desvios de refração vertical variam entre -65 mm às 15:00 e -25 mm às 15:50.

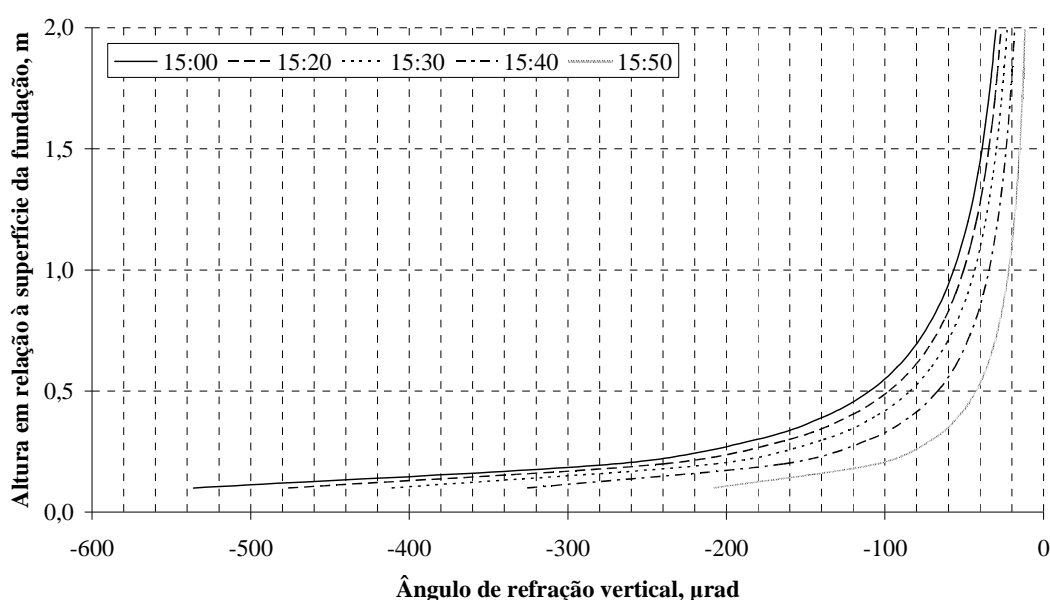


Figura 4.53: Evolução dos ângulos de refração vertical para diferentes posições verticais do alvo na fundação da torre sul (2013-06-05).

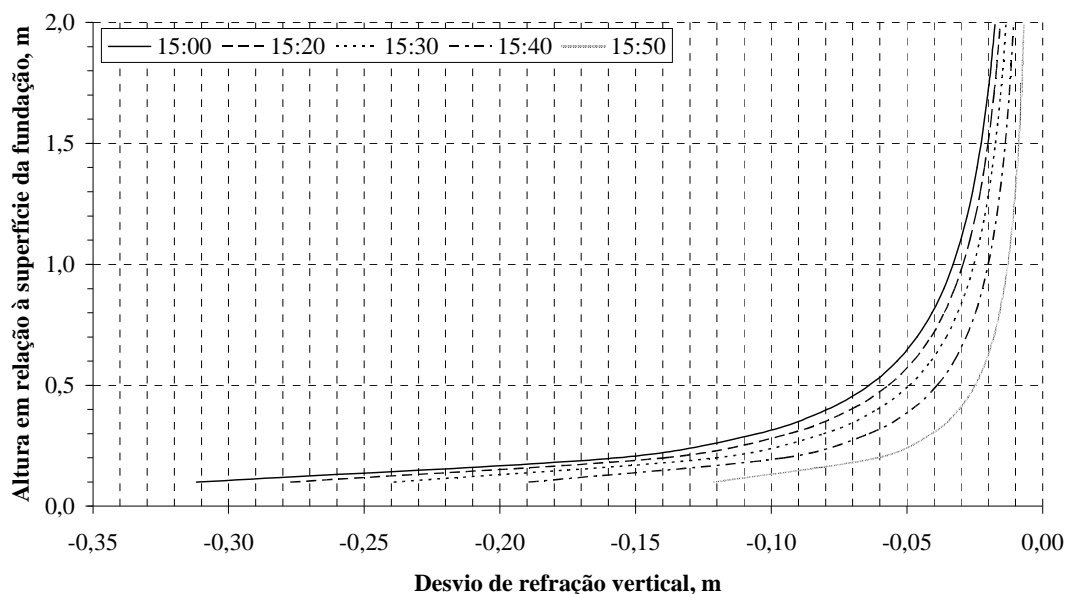


Figura 4.54: Evolução dos desvios de refração vertical para diferentes posições verticais do alvo na fundação da torre sul (2013-06-05).

A distribuição vertical não-linear de temperatura do ar faz com que o desvio de refração vertical seja fortemente dependente da posição do alvo relativamente à superfície da fundação. Como exemplo, refira-se que um aumento de altura da posição do alvo para 1,0 m origina uma redução da ordem de 50% na magnitude dos desvios verticais relativamente à posição vertical de 0,5 m.

Os resultados anteriores mostram o significativo impacto das condições térmicas do cenário de observação da P25A, sobretudo, no que diz respeito à época do ano (verão) e ao local de instalação do referencial de medição (fundação da torre sul). Este facto justificou o estudo complementar das condições termohigrométricas na fundação da torre sul durante a época de inverno, tendo por objetivo avaliar a magnitude do fenómeno atmosférico da refração vertical numa época do ano, onde é expectável uma menor influência térmica no meio de propagação. Pretendeu-se, desta forma, estabelecer uma base inicial de conhecimento das condições extremas de observação diurna durante verão e inverno salientando-se que, pela sua reduzida dimensão e pela elevada variabilidade temporal (diária e anual) das condições de observação, estas não constituem amostras representativas do comportamento termohigrométrico da região estudada numa dada época do ano.

A análise comparativa apresentada em seguida é suportada em medições termohigrométricas realizadas no verão (2013-06-05) e no inverno (2014-03-26), à mesma hora do dia (15:50), sem cobertura de nuvens e na ausência de sombra na fundação da torre sul da P25A. As Figuras 4.55 e 4.56 ilustram as diferenças obtidas a nível termohigrométrico com a altura em relação à superfície da fundação. Por sua vez, a Figura 4.56 mostra as respectivas evoluções em altura do índice de refração.

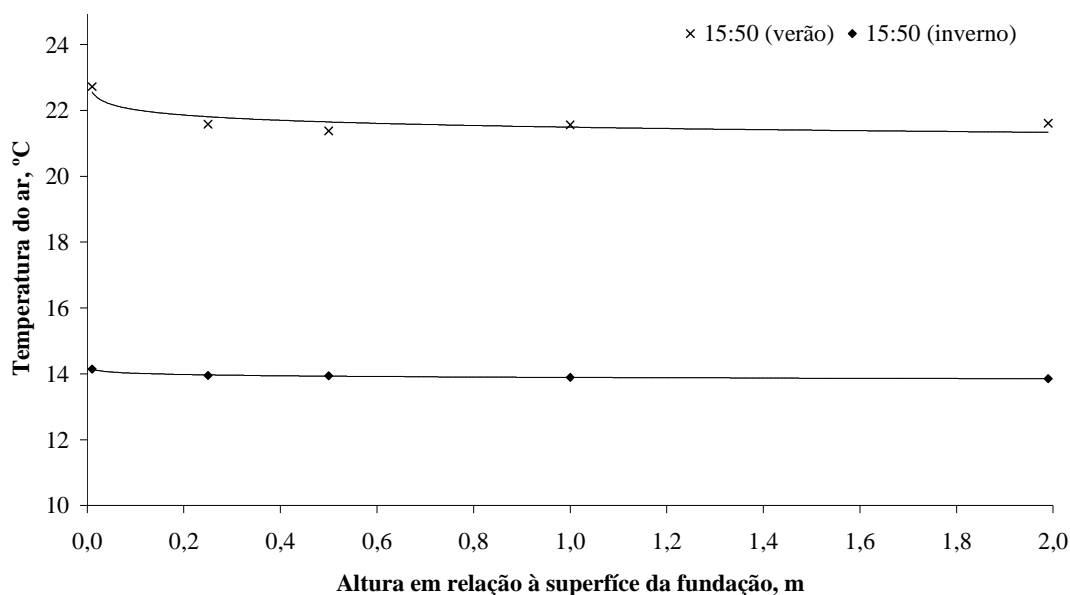


Figura 4.55: Distribuição vertical da temperatura do ar na fundação da torre sul (verão e inverno).

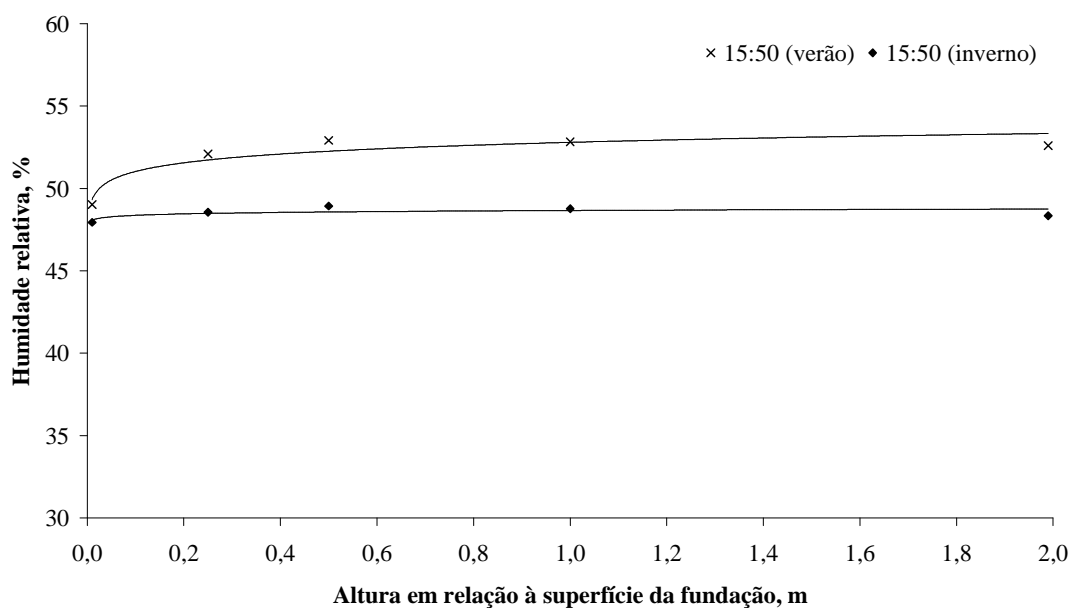


Figura 4.56: Distribuição vertical da humidade do ar na fundação da torre sul (verão e inverno).

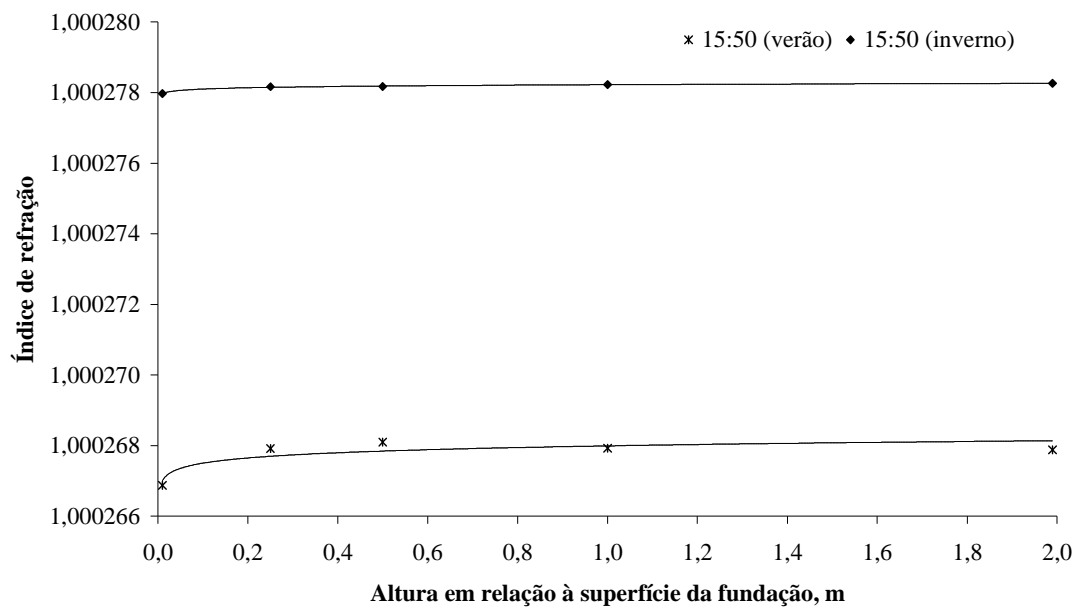


Figura 4.57: Distribuição vertical do índice de refração na fundação da torre sul (verão e inverno).

Conforme era esperado, a temperatura média do ar é significativamente inferior no inverno (cerca de 14 °C, enquanto no verão é próxima de 22 °C) notando-se, nesta época do ano, uma menor variação térmica vertical, sobretudo, até 0,25 m em altura face ao observado no verão. A nível higrométrico, as diferenças de humidade relativa não foram significativas (estimativas próximas de 50% mas ligeiramente mais baixa no inverno) notando-se, novamente, uma menor variação vertical da humidade relativa (entre 0,01 m e 0,25 m) no inverno, comparativamente com o que foi registado no verão. As distribuições verticais calculadas para o índice de refração refletem as referidas condições termohigrométricas mencionadas: no inverno observa-se um valor de índice de refração aproximadamente constante em altura (em torno do valor 1,000 278) enquanto que, no verão, o valor global do índice de refração é mais baixo notando-se uma evolução mais acentuada em altura (de 1,000 267 para 1,000 268), sobretudo na região vertical mais próxima da superfície da fundação.

As evoluções verticais obtidas no inverno para as grandezas temperatura do ar, humidade relativa e índice de refração na fundação da torre sul podem ser aproximadas por um modelo paramétrico de potência, à semelhança do que foi efetuado para as observações realizadas no verão (*vide* expressões 4.2 a 4.6). O Quadro 4.18 permite comparar as estimativas dos parâmetros de potência (a e b) das

duas épocas do ano estudadas. As Figuras 4.58 e 4.59 comparam, igualmente, os gradientes verticais de temperatura e índice de refração calculados com base nas respectivas expressões analíticas associadas ao modelo paramétrico de potência (*vide* expressões 4.3 e 4.6).

Quadro 4.18: Estimativas dos parâmetros dos modelos de potência de temperatura do ar, humidade relativa e índice de refração.

Época do ano	Verão (2013-06-05 às 15:50)		Inverno (2014-03-26 às 15:50)	
Grandeza	a	b	a	b
$t(Y) = a \cdot Y^b$	$21,491 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^{0,0106}$	$-1,06 \cdot 10^{-2}$	$13,892 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^{0,00392}$	$-3,92 \cdot 10^{-3}$
$hr(Y) = a \cdot Y^b$	$52,805\% \cdot \text{m}^{-0,0148}$	$1,48 \cdot 10^{-2}$	$48,667\% \cdot \text{m}^{-0,00262}$	$2,62 \cdot 10^{-3}$
$n(Y) = a \cdot Y^b$	$1,000\,267\,992 \text{ m}^{-2,13 \cdot 10^{-7}}$	$2,13 \cdot 10^{-7}$	$1,000\,278\,223 \text{ m}^{-5,38 \cdot 10^{-8}}$	$5,38 \cdot 10^{-8}$

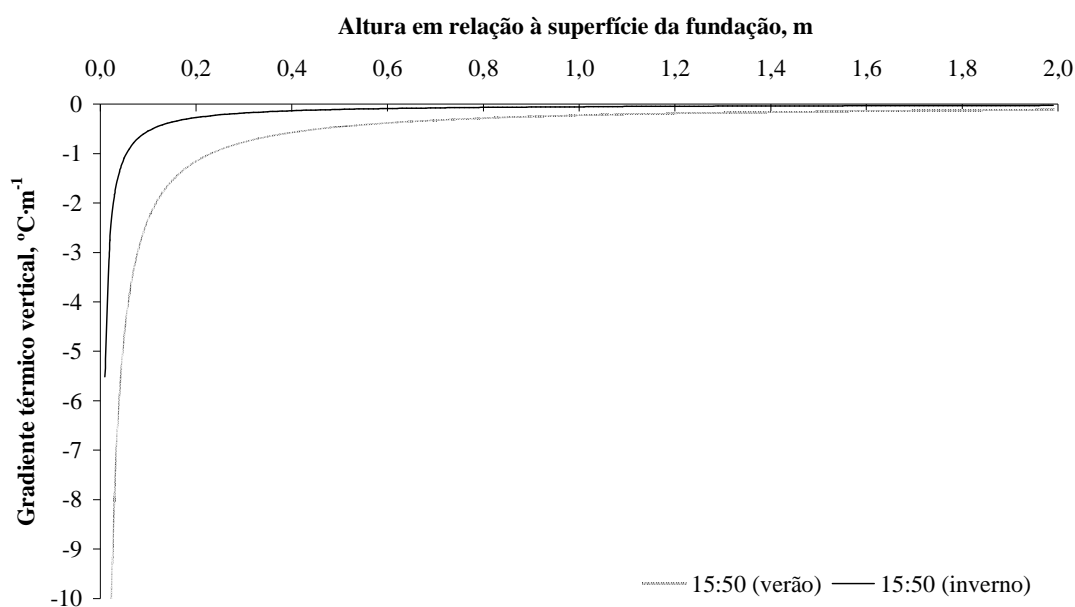


Figura 4.58: Gradiente vertical da temperatura do ar junto à superfície de topo da fundação da torre sul no verão e no inverno.

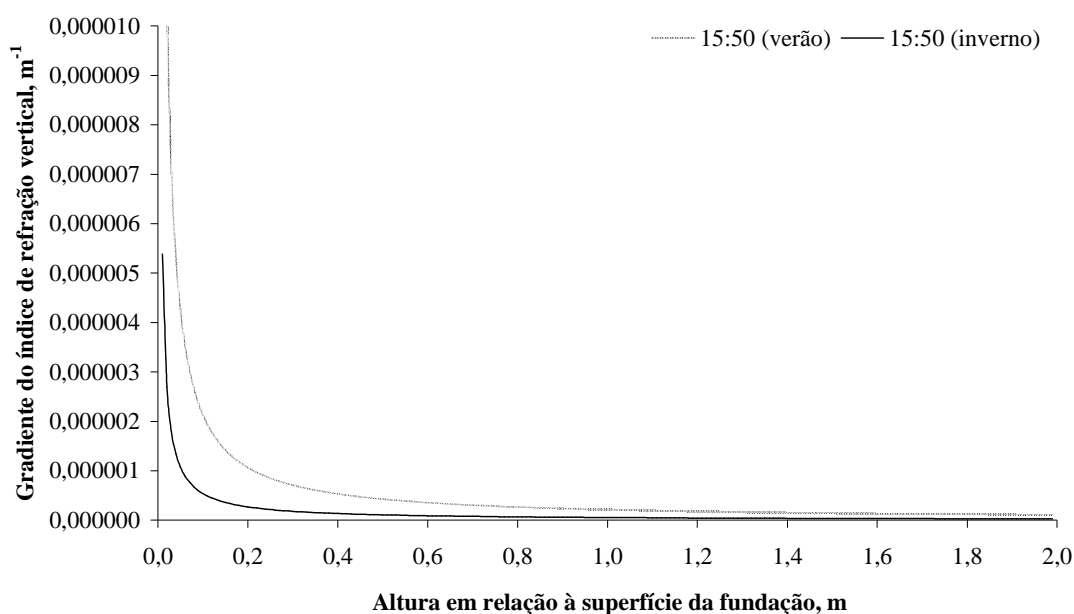


Figura 4.59: Gradiente vertical do índice de refração junto à superfície de topo da fundação da torre sul no verão e no inverno.

Estas duas Figuras mostram diferenças significativas entre gradientes verticais térmicos e, conseqüentemente, do índice de refração entre as duas épocas do ano estudadas, sobretudo, para alturas em relação à superfície de topo da fundação inferiores a 0,5 m. Este comportamento não-linear implica o recurso a abordagem geodésica para determinação dos correspondentes ângulos e desvios de refração vertical representados, respetivamente, nas Figuras 4.60 e 4.61, tendo em conta a mesma configuração geométrica estudada anteriormente (*vide* Quadros 4.15 ou 4.16).

Tomando como referência uma altura nominal de 0,5 m em relação à superfície de topo da fundação da torre sul, as Figuras 4.60 e 4.61 mostram que a magnitude do ângulo de refração vertical diminui, aproximadamente, quatro vezes (de 40 μ rad para 10 μ rad) entre épocas de observação (do verão para o inverno), o que conseqüentemente se deverá refletir no desvio vertical que passa de -25 mm para -6 mm.

O valor do ângulo de refração obtido no inverno (10 μ rad) ainda é superior ao valor de resolução angular instrumental do sistema óptico desenvolvido para a P25A (corresponde, aproximadamente, a 3 μ rad) pelo que, para a altura à superfície considerada, o sistema será sensível ao fenómeno da refração vertical (mesmo numa

altura do ano em que o gradiente térmico vertical não é tão significativo como no verão). De acordo com a Figura 4.60, só um posicionamento mais elevado do referencial de medição (superior a 2 m) iria resultar num ângulo de refração vertical ao qual o sistema óptico não seria sensível. Na impossibilidade de concretização prática desta solução, uma melhoria da exatidão do deslocamento medido passa pela aplicação de correções do desvio de refração vertical às coordenadas mundo dos alvos, tendo em conta os dois níveis de altura em relação à superfície de topo da fundação (o alvo 1 possui um afastamento nominal vertical de 250 mm em relação aos restantes alvos, conforme ilustrado na Figura 4.18).

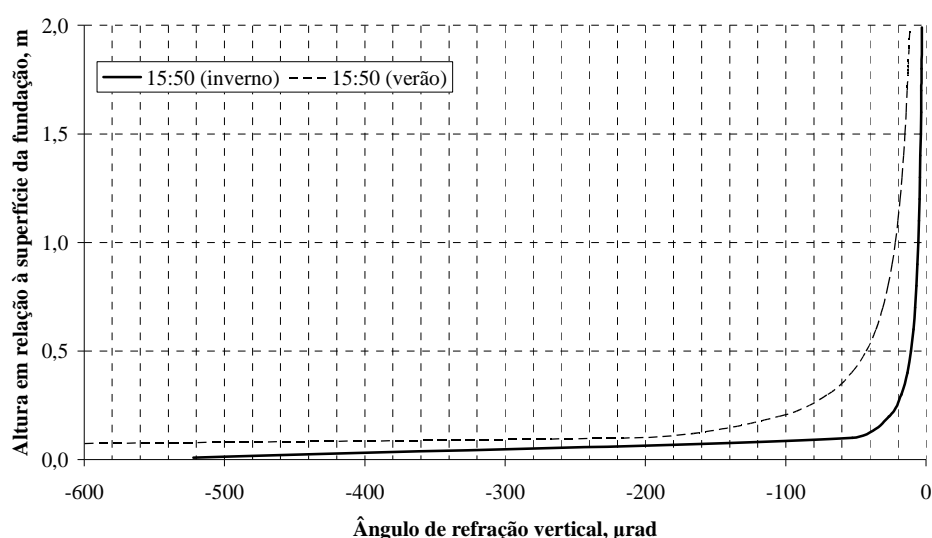


Figura 4.60: Relação entre o ângulo de refração vertical e a altura ao solo (verão e inverno).

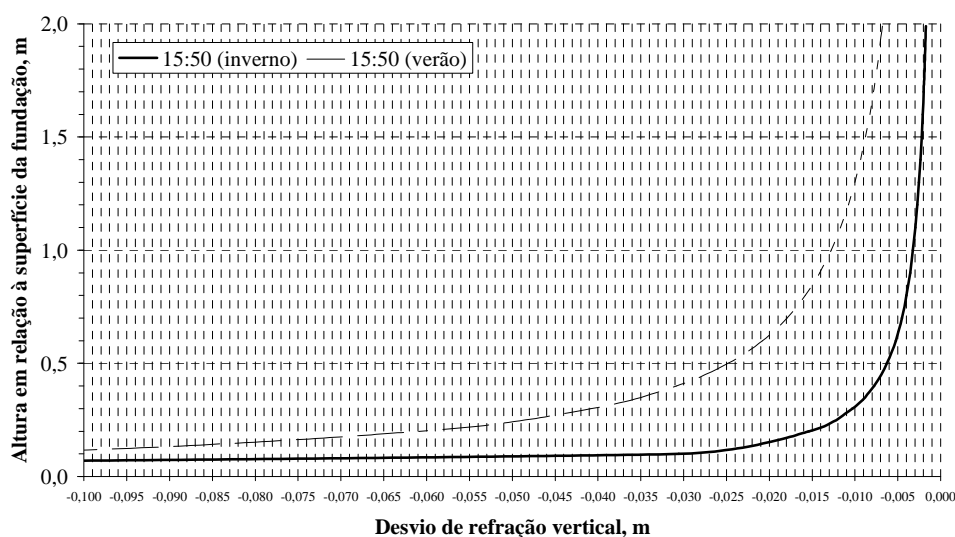


Figura 4.61: Relação entre o desvio de refração vertical e a altura ao solo (verão e inverno).

4.5.2 Turbulência atmosférica

Nesta secção são descritos os trabalhos experimentais desenvolvidos na P25A tendo em vista a melhoria do conhecimento sobre a contribuição térmica do meio de propagação para a ocorrência do fenómeno da turbulência atmosférica, sobretudo, no que respeita ao efeito de feixe errante, o qual tem um impacto direto nas coordenadas imagem dos alvos e, conseqüentemente, no nível de exatidão da medição óptica de deslocamento a longa distância.

Numa primeira fase foi efetuada uma avaliação primária das condições térmicas necessárias à ocorrência de turbulência atmosférica na direção vertical, suportada no modelo simplificado (apresentado na secção 3.6.4) dedicado ao cálculo do gradiente térmico vertical que constitui a condição fronteira entre cenários favoráveis ou desfavoráveis à observação dimensional. O conhecimento deste valor limite, em conjunto com os gradientes térmicos verticais medidos na fundação da torre sul e no ½ vão principal da P25A (descritos na secção anterior 4.5.1), permitem classificar o cenário de observação como estável ou instável no que respeita à turbulência atmosférica.

O Quadro 4.19 apresenta os gradientes térmicos verticais registados na fundação da torre sul da P25A em 2013-06-05 (conforme método e instrumentos de medição descritos na secção 4.5.1 para o estudo da refração atmosférica vertical) e os respetivos valores limite da condição fronteira (estável/instável). Estes últimos valores foram calculados com base nas condições ambientais locais medidas por via direta (temperatura do ar, humidade relativa e pressão atmosférica) e por via indireta (massa volúmica do ar húmido).

O Quadro 4.19 mostra que, para o período de tempo analisado, foram identificadas condições instáveis de observação por efeito de turbulência em todas as posições estudadas visto que os valores dos gradientes térmicos verticais observados são inferiores aos valores limite calculados, sobretudo, para alturas inferiores a 0,25 m. Como era esperado, a diferença entre valores observados e limite tende a decrescer com o aumento de altura. Contudo, mesmo para uma posição vertical de 1,99 m, é possível constatar condições desfavoráveis de observação por motivo de turbulência (diferença de duas ordem de grandeza entre valores observados e limite). Salienta-se a baixa magnitude do valor limite, bem como o reduzido intervalo da sua variação temporal, compreendida entre $-3,3 \text{ mK}\cdot\text{m}^{-1}$ e $-2,5 \text{ mK}\cdot\text{m}^{-1}$.

Quadro 4.19: Valores observados e limite para gradientes térmicos verticais na fundação da torre sul em 2013-06-05.

Altura	0,01 m		0,25 m		0,50 m	
Tempo (hh:mm)	Valor observado (°C·m ⁻¹)	Valor limite (°C·m ⁻¹)	Valor observado (°C·m ⁻¹)	Valor limite (°C·m ⁻¹)	Valor observado (°C·m ⁻¹)	Valor limite (°C·m ⁻¹)
15:00	-66,11	-0,003 3	-2,46	-0,003 0	-1,21	-0,002 6
15:20	-57,76	-0,003 1	-2,15	-0,002 8	-1,06	-0,002 5
15:30	-49,07	-0,003 0	-1,84	-0,002 8	-0,91	-0,002 5
15:40	-38,48	-0,003 0	-1,46	-0,002 8	-0,72	-0,002 5
15:50	-23,92	-0,002 7	-0,92	-0,002 6	-0,46	-0,002 6
Altura	1,00 m		1,99 m			
Tempo (hh:mm)	Valor observado (°C·m ⁻¹)	Valor limite (°C·m ⁻¹)	Valor observado (°C·m ⁻¹)	Valor limite (°C·m ⁻¹)		
15:00	-0,60	-0,002 7	-0,29	-0,002 6		
15:20	-0,52	-0,002 6	-0,26	-0,002 5		
15:30	-0,45	-0,002 6	-0,22	-0,002 5		
15:40	-0,35	-0,002 5	-0,18	-0,002 5		
15:50	-0,23	-0,002 5	-0,11	-0,002 5		

O mesmo tipo de análise foi realizada para a região inferior do ½ vão principal da viga de rigidez (entre 60 m e 62 m de altura) com recurso às medições de temperatura do ar obtidas com perfil vertical instrumentado (em 2013-06-05, com diferença de três horas em relação às medições efetuadas na fundação da torre sul). Devido à influência térmica da plataforma móvel localizada abaixo da superfície inferior da viga de rigidez (conforme discutido anteriormente na secção 4.5.1), os valores de temperatura do ar relativos à posição vertical de 60 m não foram considerados na determinação (por regressão linear) do gradiente térmico vertical observado. O Quadro 4.20 expõe os valores observados e limite obtidos.

Quadro 4.20: Valores observados e limite para gradientes térmicos verticais na região inferior do ½ vão principal (em 2013-06-05).

Tempo (hh:mm)	Valor observado (°C·m ⁻¹)	Valor limite (°C·m ⁻¹)
11:25	0,11	-0,002 1
11:45	0,13	-0,002 1
11:55	0,12	-0,002 1
12:05	0,11	-0,002 1
12:25	0,16	-0,002 1

A comparação entre valores de gradientes térmicos na região inferior da viga de rigidez evidencia condições de observação estáveis na região analisada (entre 61 m e 62 m), visto que o gradiente térmico vertical observado (positivo por influência da

transferência de calor da viga de rigidez para o meio envolvente) é superior ao valor limite calculado para as condições ambientais locais (valor constante de $-2,1 \text{ mK}\cdot\text{m}^{-1}$, ligeiramente superior ao calculado para a fundação). Esta situação é oposta à condição observada para a fundação da torre sul, mostrando que, no período de tempo estudado, esta região inicial da trajetória óptica (correspondente ao local de instalação do referencial de medição com alvos ativos) favorece a ocorrência de turbulência e, conseqüentemente, possui uma influência dominante nas coordenadas imagem dos alvos visualizados pelo sistema óptico.

Esta importância acrescida da fundação da torre sul para o processo de medição dimensional justificou a realização de estudo térmico complementar, desta vez, em época de inverno (em 2014-03-26) mais favorável à realização de observações. Pretendeu-se, deste modo, determinar novamente os valores de gradientes térmicos verticais observados e limite, avaliar a existência de condições propícias à ocorrência de turbulência atmosférica e efetuar uma comparação com um cenário mais desfavorável à realização de observações em época de verão (em 2013-06-05) no mesmo instante de tempo (por volta das 15:50). O Quadro 4.21 apresenta os resultados que suportam a comparação pretendida.

Quadro 4.21: Valores observados e limite para gradientes térmicos verticais na fundação da torre sul nas épocas de inverno e verão (às 15:50).

Altura	0,01 m		0,25 m		0,50 m	
Data	Valor observado ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$)	Valor limite ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$)	Valor observado ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$)	Valor limite ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$)	Valor observado ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$)	Valor limite ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$)
2013-06-05	-23,92	-0,002 7	-0,92	-0,002 6	-0,46	-0,002 6
2014-03-28	-5,52	-0,001 7	-0,22	-0,001 7	-0,11	-0,001 7
Altura	1,00 m		1,99 m			
Data	Valor observado ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$)	Valor limite ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$)	Valor observado ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$)	Valor limite ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$)		
2013-06-05	-0,23	-0,002 5	-0,11	-0,002 5		
2014-03-28	-0,05	-0,001 6	-0,03	-0,001 6		

A análise do Quadro 4.21 revela que, embora os gradientes térmicos verticais observados na época de inverno apresentem uma magnitude superior aos valores referentes ao cenário de observação em época de verão, os valores obtidos continuam a ser inferiores aos valores limite calculados (entre $-1,7 \text{ mK}\cdot\text{m}^{-1}$ e $-1,6 \text{ mK}\cdot\text{m}^{-1}$) pelo que ainda se verificaram condições térmicas favoráveis à ocorrência de turbulência na fundação da torre sul da P25A. Contudo, é notória a evolução no sentido de mitigação

do fenómeno de turbulência atmosférica da época de verão para inverno, como se observa no caso da altura de 1,99 m, onde a diferença entre valores observados e limite passa de duas para uma ordem de grandeza de diferença. As diferenças encontradas ao nível de valores limite são justificadas pelas diferenças de temperatura do ar (14 °C e 22 °C), pressão atmosférica (1024 hPa e 1013 hPa) e massa volúmica ($1,24 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ e $1,19 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) entre as épocas de inverno e verão, respetivamente.

A quantificação da dispersão dos valores das coordenadas imagem dos alvos decorrente de turbulência atmosférica com origem em gradientes térmicos no trajeto de propagação, foi efetuada experimentalmente através de ensaios de campo na P25A, com recurso ao sistema óptico desenvolvido para a medição de deslocamento do $\frac{1}{2}$ vão principal. Estes ensaios – do tipo feixe errante – foram efetuados com base no estabelecimento de linhas de visão entre os alvos ativos colocados na fundação da torre sul e a câmara posicionada na ancoragem sul, conforme se ilustra nas Figuras 4.62 a 4.64.

Estas duas regiões (fundação e ancoragem) são caracterizadas por um reduzido comportamento dinâmico, comparativamente com outras regiões estruturais da P25A, nomeadamente, a viga de rigidez e as torres. A aquisição de sequências de imagens nesta configuração e em condições operacionais constantes (frequência de aquisição, abertura da câmara, tempo de exposição do sensor e processamento digital de imagem) permitem atribuir o movimento registado dos alvos ao efeito de feixe errante por motivo de turbulência atmosférica.



Figura 4.62: Configuração geométrica adotada nos ensaios de campo na P25A para avaliação de feixe errante: (a) fundação da torre sul; (b) ancoragem sul.



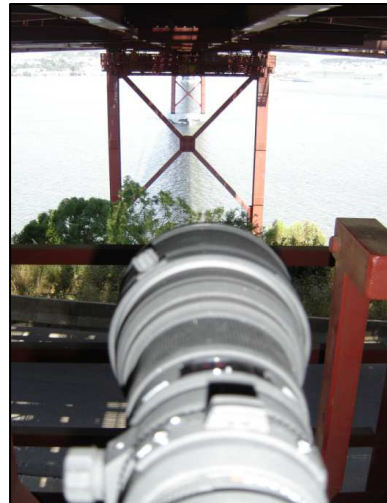
(a)



(b)



(c)

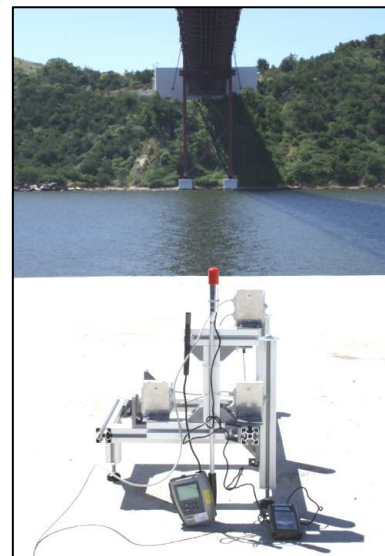


(d)

Figura 4.63: (a) Ancoragem sul da P25A; (b) Nicho de instalação da câmara;
(c) Montagem da câmara no tripé de observação; (d) Linha de visão para a fundação da torre sul.



(a)



(b)

Figura 4.64: (a) Referencial de medição na fundação da torre sul;
(b) Linha de visão para a ancoragem sul.

As principais diferenças entre as configurações geométricas dos ensaios de feixe errante e de medição dimensional dinâmica do $\frac{1}{2}$ vão principal residem na distância de observação (582 m e 510 m, respetivamente) e na elevação da linha de visão (7° e 6° , respetivamente), notando-se que, em ambos os ensaios, a câmara se encontra a uma cota altimétrica nominal de 61 m. Este facto justifica que as condições ambientais do meio envolvente sejam idênticas em ambos os casos salientando-se que, apenas no caso do ensaio de feixe errante, a influência da encosta na margem sul do rio Tejo, sobre a qual o trajeto óptico apresenta um comprimento da ordem de 100 m enquanto que, no ensaio de medição dimensional, o trajeto óptico se faz maioritariamente sobre a superfície da água.

A região de instalação da câmara na ancoragem sul é caracterizada por uma adequada proteção contra o vento, cuja inexistência poderia comprometer os resultados obtidos, tendo em conta a sua influência dinâmica sobre a câmara montada no tripé de observação. Dada a sua proximidade em relação ao tabuleiro inferior da viga de rigidez, todos os ensaios foram realizados na ausência de tráfego ferroviário, visto este tipo de tráfego na P25A induzir vibrações na câmara por ação aerodinâmica (movimentação do ar com a passagem de comboio) e por transmissão de vibrações através da estrutura de betão da ancoragem. No que respeita ao referencial de medição com alvos, instalado numa estrutura de apoio dedicada na fundação, notou-se que a sua massa e superfície de exposição aerodinâmica foram adequadas para minimizar a ação do vento, não se observando vibrações ao nível da fundação por influência dinâmica da torre e do escoamento do rio em seu redor.

Os primeiros ensaios foram realizados na época de verão (em 2013-07-09) e constituíram a primeira oportunidade de ensaio de campo para exploração da relação dos parâmetros operacionais abertura da câmara e tempo de exposição do sensor na qualidade de imagem dos alvos posicionados a longa distância. Numa primeira abordagem a este problema, procurou-se definir uma abertura mínima da câmara ($f/32$) tendo a vista a atenuação de reflexões provenientes do meio envolvente aos alvos (superfícies da fundação e do rio) e evitar a saturação do sensor melhorando, deste modo, o contraste dos alvos e facilitando o processamento digital da sua imagem. No que respeita ao tempo de exposição, procurou-se garantir um valor suficientemente elevado (entre 15 ms e 25 ms) para assegurar que um número elevado

de fótons provenientes dos alvos pudessem atingir o sensor de imagem constituindo uma observação com valor médio aproximadamente constante.

O Quadro 4.22 resume o conjunto de parâmetros operacionais adotados no referido conjunto de ensaios de feixe errante. Com exceção do intervalo de tempo de observação, a definição dos restantes parâmetros é idêntica à pretendida para os ensaios dimensionais de observação do ½ vão principal da P25A, no que respeita à posição de focagem, utilização de filtro óptico passa-alto, intensidade de corrente total nos LEDs que compõem os alvos ativos e frequência de aquisição de imagem.

Quadro 4.22: Parâmetros operacionais dos ensaios de feixe errante realizados no verão (2013-07-09).

Id. do ensaio	Posição de focagem	Filtro óptico passa-alto	Intensidade de corrente total nos LEDs	Frequência de aquisição de imagem	Intervalo de tempo de observação	Abertura da câmara	Tempo de exposição
1	A (∞)	Sim	300 mA	15 Hz	5 s	f/32	15 ms
2							25 ms
3							
4							

O processamento digital individual das imagens adquiridas consistiu nas seguintes etapas sequenciais (*vide* Figura 4.65): (i) operação de *thresholding* suportada no número digital associado aos alvos; (ii) transformação morfológica de fecho (erosão após dilatação com elemento estruturante tipo disco) da imagem binária obtida da etapa anterior e determinação dos centróides dos alvos; (iii) criação de sub-imagem com o conjunto de alvos, seguida de determinação de contorno e ajuste de elipses aos alvos e determinação dos respetivos centros geométricos.

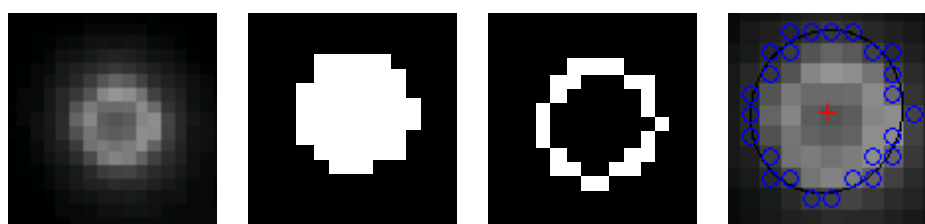


Figura 4.65: Etapas do processamento digital de imagem (da esq. para a dir.) – imagem original, imagem binária, imagem do contorno, imagem de ajuste de elipse.

O Quadro 4.23 apresenta o resumo das condições ambientais registadas na realização dos ensaios de feixe errante realizados no verão. A dispersão dos valores associados às coordenadas imagem dos alvos em cada ensaio foi caracterizada pelo desvio padrão experimental da amostra obtida (sequência de imagens, *vide* exemplo

de imagem na Figura 4.66), cuja quantificação se menciona no Quadro 4.24, enquanto que nas Figuras 4.67 e 4.68 se exemplifica o registo de coordenadas obtido no ensaio n.º 1 de feixe errante.

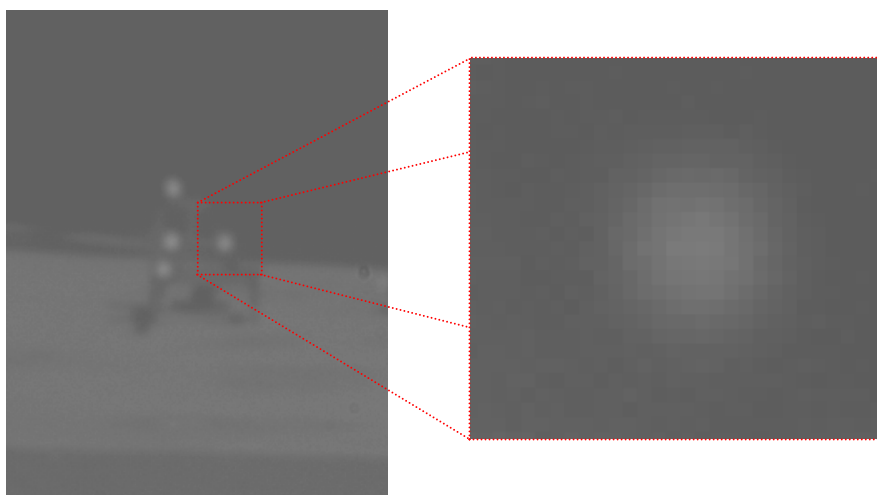


Figura 4.66: Imagem global do referencial no ensaio de feixe errante no verão (à esq.) e pormenor da sub-imagem do alvo (à dir.).

Quadro 4.23: Condições ambientais registadas nos ensaios de feixe errante realizados no verão (2013-07-09).

Tempo (hh:mm) e id. do ensaio	Sombra nos alvos	Cobertura de nuvens	Ancoragem sul				Fundação da torre sul			
			t (°C)	hr (%)	v_{vento} (m·s ⁻¹)	Direção do vento	t (°C)	hr (%)	v_{vento} (m·s ⁻¹)	Direção do vento
12:18 Ensaio 1	Sem sombra	Não	21,8	83,4	1,5	Noroeste	24,5	69,5	6	Noroeste
12:50 Ensaio 2	Quase sombra		22,1	81,2	1,3		28,5	48,1	4	
13:05 Ensaio 3	Início de sombra		22,1	80,6	1,4		24,6	65,3	4	
13:07 Ensaio 4	Sombra plena		22,1	80,9	2,2		23,8	72,4	6	

Quadro 4.24: Desvios padrão experimentais das amostras (coordenadas imagem dos alvos)

Id. do ensaio		1	2	3	4
Alvo 1	s(x)	0,50	0,35	0,35	0,29
	s(y)	0,54	0,36	0,45	0,45
Alvo 2	s(x)	0,51	0,29	0,38	0,26
	s(y)	0,50	0,34	0,46	0,43
Alvo 3	s(x)	0,49	0,35	0,39	0,24
	s(y)	0,55	0,43	0,49	0,45
Alvo 4	s(x)	0,52	0,32	0,37	0,25
	s(y)	0,56	0,36	0,46	0,43

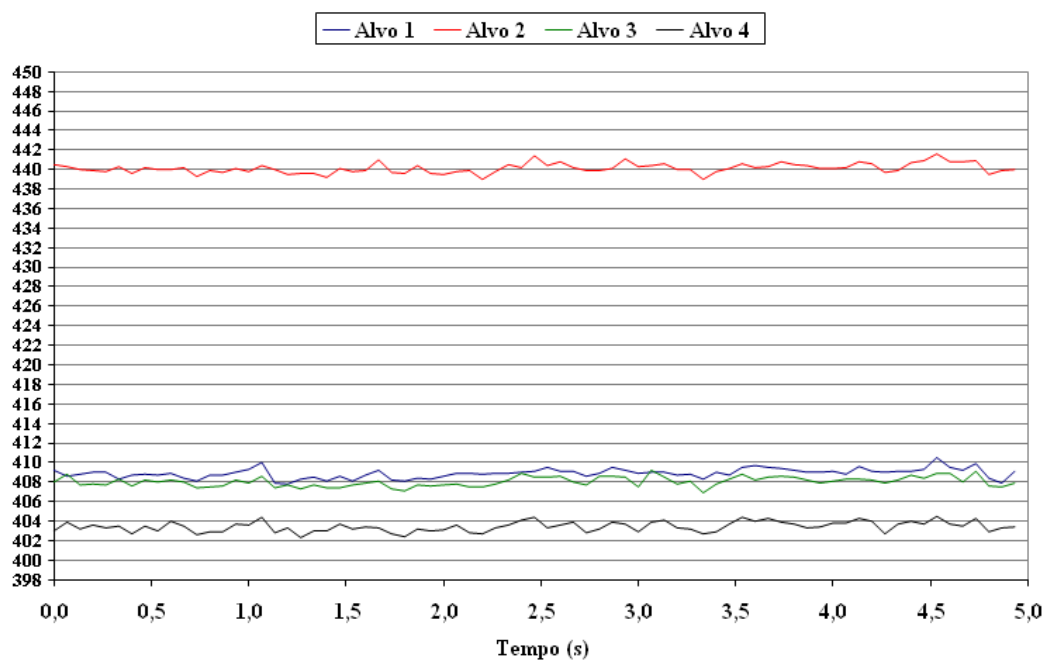


Figura 4.67: Registo de coordenadas imagem (píxeis) dos centros dos alvos na direcção x em ensaio de feixe errante.

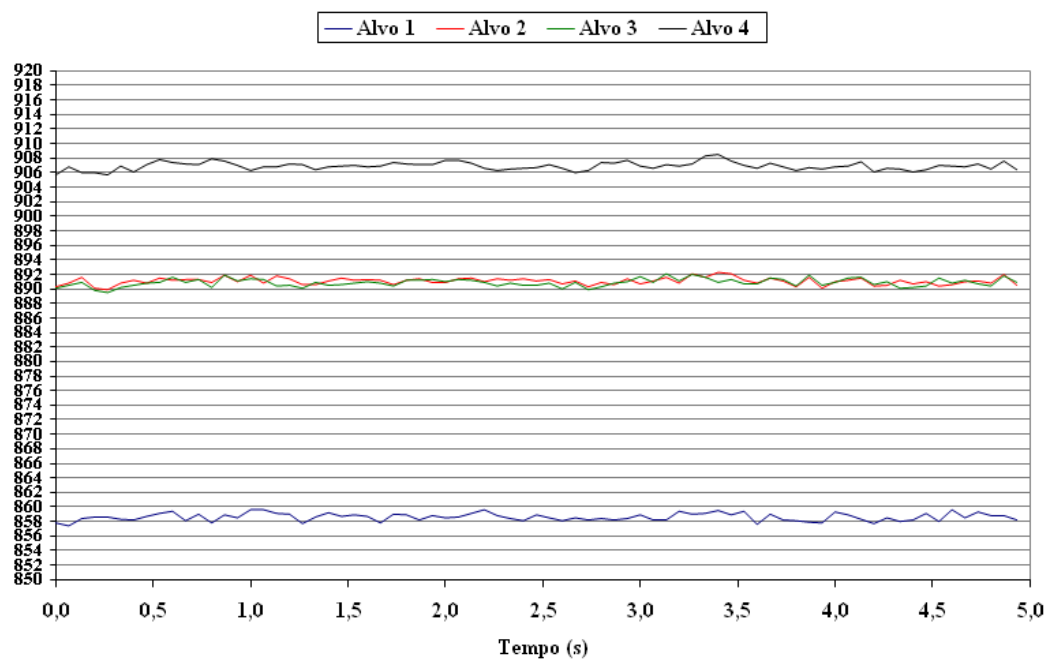


Figura 4.68: Registo de coordenadas imagem (píxeis) dos centros dos alvos na direcção y em ensaio de feixe errante.

Os resultados apresentados mostram a influência do efeito de sombra na região da fundação da torre sul na época estudada (verão), notando-se uma diminuição da dispersão de valores associados às coordenadas imagem dos alvos à medida que se evolui de uma situação de inexistência de sombra (maiores desvios padrão da amostra no ensaio 1) para a ocorrência de sombra plena sobre o conjunto de alvos (menores desvios padrão no ensaio 4). A diminuição da incidência solar sobre a superfície da fundação origina uma rápida diminuição da temperatura do ar (de 28,5 °C para 23,8 °C num intervalo de tempo de 17 minutos), o que se reflete num menor gradiente térmico vertical e, conseqüentemente, numa diminuição do efeito de feixe errante por motivo de turbulência atmosférica. Este decréscimo de dispersão é, sobretudo, notado a nível horizontal (direção x da imagem) verificando-se que, na condição de inexistência de sombra (ensaio 1), os valores de dispersão são, aproximadamente, iguais independentemente da direção considerada. Salienta-se, igualmente, que não existem diferenças significativas de desvios padrão entre os quatro alvos analisados em cada ensaio, embora estes estejam a diferentes alturas em relação à superfície da fundação e possuam diferentes instantes de entrada na sombra da viga de rigidez.

Foi possível realizar ensaios de feixe errante em época de inverno (em 2014-03-18), procurando identificar eventuais diferenças de dispersão das coordenadas imagem dos alvos em relação aos resultados apresentados anteriormente para a época de verão. Foi igualmente estudada a influência dos parâmetros operacionais de abertura da câmara, tempo de exposição e intervalo de observação nos resultados obtidos. O Quadro 4.25 resume os parâmetros operacionais estabelecidos para os ensaios de feixe errante realizados no inverno, enquanto que o Quadro 4.26 se refere às condições ambientais registadas durante a sua realização. Por sua vez, a Figura 4.69 mostra uma imagem típica do referencial, obtida num ensaio de feixe errante (no inverno com abertura $f/5,6$).

Quadro 4.25: Parâmetros operacionais dos ensaios de feixe errante – inverno (2014-03-18).

Id. do ensaio	Posição de focagem	Filtro óptico passa-alto	Intensidade de corrente total nos LEDs	Frequência de aquisição de imagem	Intervalo de tempo de observação	Abertura da câmara	Tempo de exposição
5	A (∞)	Sim	300 mA	15 Hz	5 s	$f/32$	15 ms
6					40 s	$f/5,6$	2,5 ms
7					5 s		
8					30 s		
9							

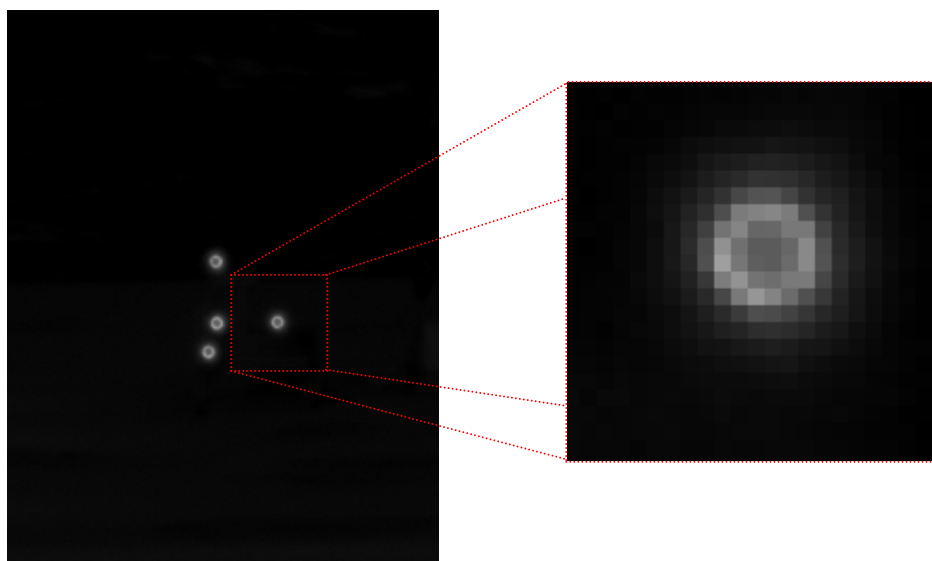


Figura 4.69: Imagem global do referencial no ensaio de feixe errante no verão (à esq.) e pormenor da sub-imagem do alvo (à dir.).

Quadro 4.26: Condições ambientais registadas nos ensaios de feixe errante realizados no inverno (2014-03-18).

Tempo (hh:mm) e id. do ensaio	Sombra nos alvos	Cobertura de nuvens	Ancoragem sul				Fundação da torre sul			
			t (°C)	hr (%)	v_{vento} (m·s ⁻¹)	Direção do vento	t (°C)	hr (%)	v_{vento} (m·s ⁻¹)	Direção do vento
12:42 Ensaio 5	Sombra plena	Não	15,4	61,4	0,5	Norte	16,4	56,8	4	Norte
12:55 Ensaio 6	Sem sombra		15,3	60,1	0,5		16,9	55,5	4	
12:45 Ensaio 7	Fim de sombra		15,4	61,2	0,7		16,5	58,8	5	
12:05 Ensaio 8	Sombra plena		14,8	64,4	0,8		16,9	55,3	3	
12:08 Ensaio 9	Sombra plena		15,3	61,2	0,0		16,8	54,0	3	

O Quadro 4.26 mostra uma maior estabilidade e uniformidade das condições ambientais do cenário de observação na época de inverno comparativamente com os valores mencionados para a época de verão (*vide* Quadro 4.23), mesmo considerando as alterações relativas ao efeito de sombra na fundação da torre sul. Os respetivos valores de dispersão das coordenadas imagem dos alvos são apresentados no Quadro 4.27, notando a utilização do mesmo algoritmo de processamento digital de imagem mencionado anteriormente para a época de verão.

Quadro 4.27: Desvios padrão experimentais das amostras (coordenadas imagem dos alvos)

Id. do ensaio		5	6	7	8	9
Alvo 1	s(x)	0,15	0,18	0,14	0,13	0,16
	s(y)	0,16	0,17	0,10	0,13	0,14
Alvo 2	s(x)	0,16	0,17	0,14	0,10	0,13
	s(y)	0,18	0,23	0,13	0,11	0,16
Alvo 3	s(x)	0,13	0,08	0,13	0,12	0,13
	s(y)	0,15	0,14	0,13	0,11	0,14
Alvo 4	s(x)	0,15	0,16	0,06	0,12	0,12
	s(y)	0,15	0,17	0,07	0,11	0,13

Tem particular interesse a análise de resultados do ensaio n.º 5 visto ter sido realizado nas mesmas condições operacionais (incluindo abertura da câmara, tempo de exposição e tempo de observação) do que os ensaios de feixe errante efetuados na época de verão, sobretudo com o ensaio n.º 4, no que diz respeito à condição de sombra plena sobre os alvos. As Figuras 4.70 e 4.71 resumem os resultados obtidos para as condições mencionadas (ensaio de verão e ensaio n.º 5 de inverno).

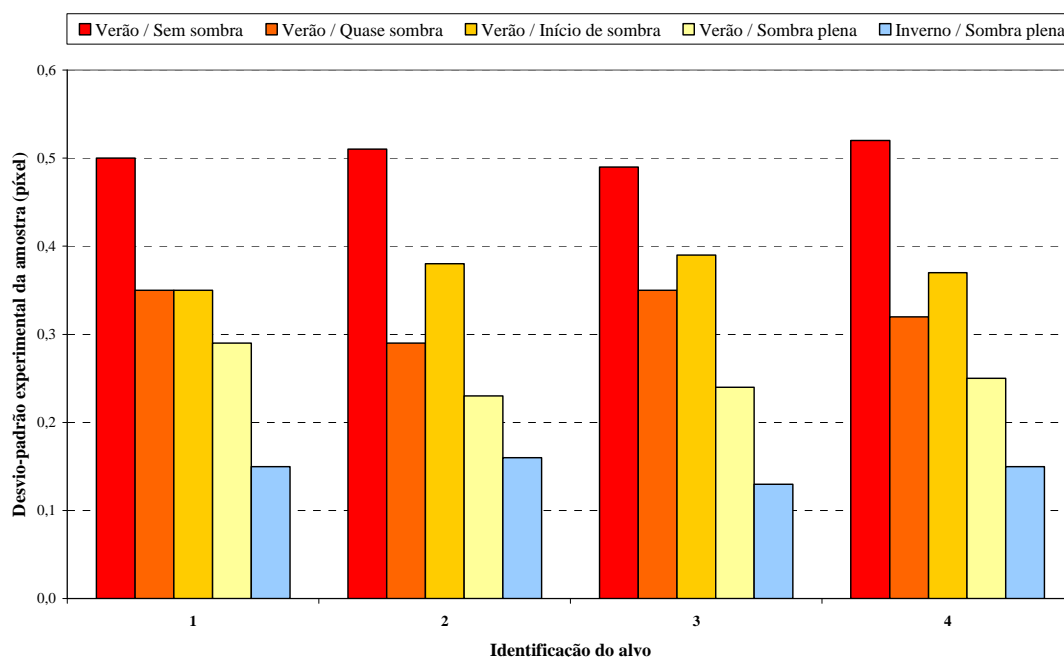


Figura 4.70: Desvios padrão experimentais das amostras de coordenadas imagem dos alvos (direção horizontal)

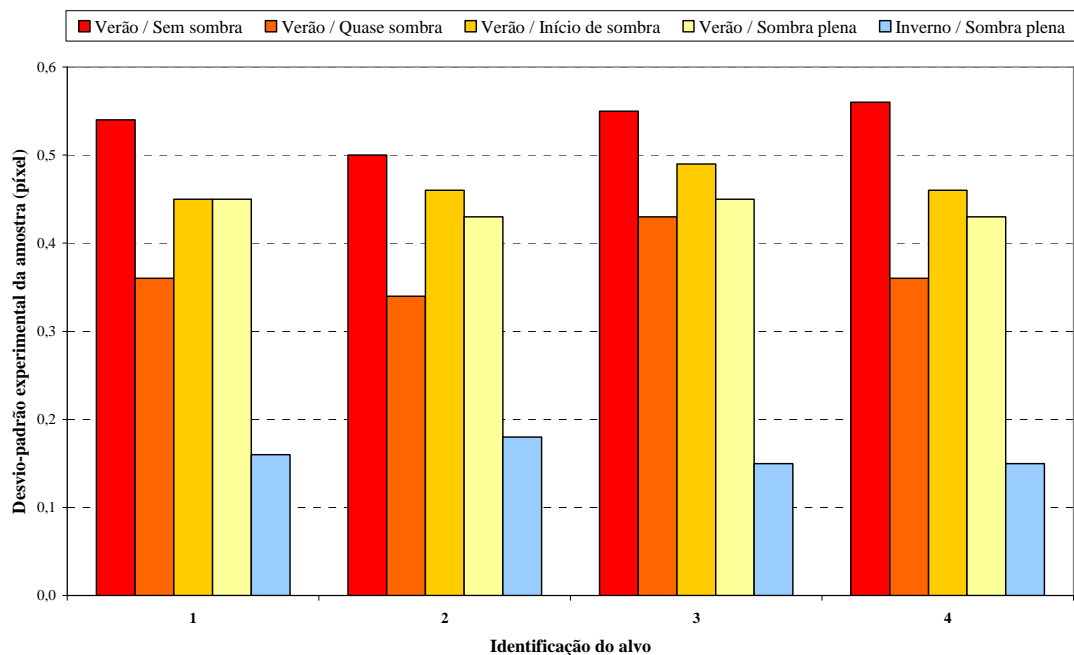


Figura 4.71: Desvios padrão experimentais das amostras de coordenadas imagem dos alvos (direção vertical)

Estas Figuras permitem observar um decréscimo significativo da dispersão de valores das coordenadas imagem dos alvos entre as épocas de verão e de inverno, sobretudo, a nível da direção y (vertical) da imagem o que evidencia a relação entre a turbulência atmosférica e o gradiente térmico vertical no meio de propagação. Nota-se, também, que as diferenças entre as direções horizontal e vertical são mais reduzidas na época de inverno.

Os restantes resultados (ensaios n.^{os} 6 a 9) permitem constatar que os parâmetros operacionais de abertura da câmara, tempo de exposição e tempo de observação não têm influência na magnitude de dispersão de valores obtida, o mesmo acontecendo com a ocorrência de sombra sobre os alvos no cenário de observação em época de inverno.

4.6 Rastreabilidade da medição dimensional ao SI

4.6.1 Introdução

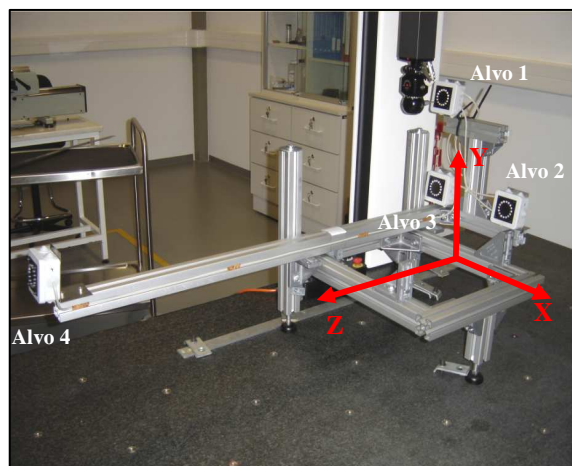
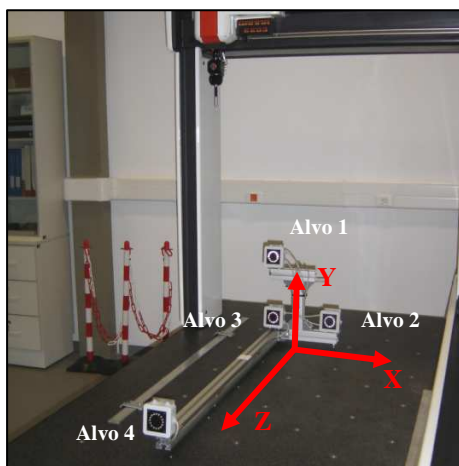
Este sub-capítulo descreve o conjunto de atividades experimentais efetuadas tendo em vista a rastreabilidade das medições dimensionais obtidas com o sistema de medição ao SI. Os estudos realizados permitiram caracterizar dimensionalmente quer o referencial de medição, quer o protótipo de padrão de referência desenvolvido para o ensaio de calibração *in situ*, e avaliar as estimativas e as incertezas de medição associadas às principais grandezas de entrada dos processos de calibração e de medição dimensional na P25A.

Na secção 4.6.2 são mencionados os ensaios laboratoriais dedicados à obtenção das estimativas das coordenadas mundo do referencial de medição e ao estudo da respetiva estabilidade dimensional com base em medições efetuadas antes e após a realização de ensaios de campo na P25A.

Por sua vez, a secção 4.6.3 relaciona-se com o ensaio dimensional do protótipo de padrão de referência desenvolvido no âmbito da calibração *in situ* do sistema de medição que, em conjunto com o referencial de medição, constituem o padrão de referência rastreável ao SI. Nesta secção são apresentadas as estimativas de deslocamentos obtidas em ensaio laboratorial, sendo também caracterizada a repetibilidade associada à montagem (manual) do referencial de medição no dispositivo de transferência.

Por último, a secção 4.6.4 é dedicada ao processo de calibração *in situ* do sistema de medição efetuado na P25A. Para além da descrição do ensaio realizado, é dada particular atenção aos aspetos relacionados com o cálculo do deslocamento lido no sistema de medição, nomeadamente, no que se refere ao processo de otimização não-linear adotado para determinação da posição do centro de projeção da câmara.

Salienta-se que os ensaios dimensionais laboratoriais do referencial de medição e do protótipo de padrão de referência – apresentados nas Figuras 4.72 e 4.73, respetivamente – foram efetuados na Unidade de Metrologia Aplicada do LNEC – Ensaios e Metrologia (UMA/LNEC-EM), a qual constitui uma unidade operativa laboratorial do LNEC integrada no Sistema Português da Qualidade desde 1995, e acreditada para a realização de ensaios dimensionais pelo Instituto Português de Acreditação (IPAC).



Figuras 4.72 e 4.73: Ensaio dimensional do referencial de medição (à esq.) e do padrão de referência (à dir.) com identificação dos alvos e sistema de coord. mundo.

4.6.2 Ensaio do referencial de medição

Este ensaio laboratorial teve por objetivo a determinação das coordenadas mundo dos quatro alvos que definem o referencial utilizado pelo sistema de medição desenvolvido, onde o centro geométrico do alvo 3 (*vide* Figura 4.72) constitui a origem do sistema de coordenadas tridimensional. Para tal, realizaram-se ensaios com recurso a uma MMC 3D, a qual constitui um padrão de referência da UMA/LNEC-EM, com rastreabilidade dimensional ao SI.

Todos os ensaios dimensionais realizados foram antecidos por um período prévio de estabilização térmica, de modo a minimizar eventuais contribuições para a incerteza de medição devido à influência associada à variação de temperatura. No ambiente da sala laboratorial foi mantida uma temperatura de $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$. A instalação e imobilização do referencial de medição na mesa-plano da MMC 3D foi efetuada por ligação mecânica amovível (mordentes).

O procedimento de medição adotado consistiu na medição de coordenadas espaciais de cinco pontos igualmente distribuídos pela superfície semiesférica do LED. Um total de oito LEDs igualmente espaçados entre si foram medidos em cada um dos quatro alvos do referencial (*vide* Figuras 4.74 e 4.75), ou seja, a realização de um ensaio dimensional do referencial implicou a medição de 32 LEDs e um total de 160 pontos.



Figuras 4.74 e 4.75: Distribuição dos LEDs medidos no alvo (à esq.) e medição por contacto da superfície semiesférica de um LED (à dir.).

O suporte computacional da MMC 3D permitiu efetuar o ajuste pelo MMQ da forma geométrica de calote esférica à superfície do LED (com base nos cinco pontos medidos) e de circunferência ao alvo (suportada nos centros geométricos das calotes esféricas obtidas para cada um dos oito LEDs medidos). Deste modo, as coordenadas do centro geométrico da circunferência em cada alvo representam a sua posição tridimensional no espaço.

Em acréscimo a estas estimativas, foi igualmente possível avaliar o desvio de circularidade obtido em cada alvo medido, tendo em conta as diferenças entre coordenadas medidas e calculadas pelo ajuste computacional de circunferência. Tendo em conta uma amostra experimental com dimensão igual a 64 de desvios de circularidade encontrados nos alvos, o valor médio correspondeu a 0,31 mm com um desvio padrão experimental da média igual a 0,07 mm.

O Quadro 4.28 apresenta os resultados do estudo experimental da repetibilidade das medições de coordenadas 3D dos alvos do referencial (incluindo valores médios e desvios padrão experimentais das amostras – DPEA), efetuado com base em 16 ensaios dimensionais realizados nas mesmas condições experimentais (ambientais, método e procedimento de ensaio e operador da MMC 3D).

Os resultados obtidos mostram que o ensaio dimensional do referencial de medição apresenta valores máximos de DPEA distintos consoante a direção de medição considerada: 0,35 mm em X , 0,19 mm em Y e 0,08 mm em Z . No caso da direção X no alvo 4, nota-se claramente a influência das estimativas associadas aos ensaios 11 e 12, as quais se afastam consideravelmente do valor médio obtido.

Quadro 4.28: Resultados dos ensaios de repetibilidade da medição dimensional do referencial.

Id. Ensaio	Alvo 1			Alvo 2			Alvo 4		
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
1	-1,0	251,4	0,0	249,3	1,7	-0,4	-0,2	-2,3	1157,2
2	-1,0	251,4	0,1	249,4	1,8	-0,3	-0,2	-2,3	1157,3
3	-1,0	251,4	0,1	249,3	1,7	-0,2	-0,3	-2,3	1157,3
4	-1,1	251,4	0,2	249,3	1,8	-0,2	-0,2	-2,3	1157,3
5	-1,2	251,4	0,2	249,4	1,8	-0,2	-0,3	-2,5	1157,3
6	-1,2	251,4	0,2	249,3	1,9	-0,2	-0,3	-2,5	1157,3
7	-1,1	251,3	0,3	249,3	1,9	-0,2	-0,3	-2,6	1157,3
8	-1,2	251,3	0,3	249,3	1,9	-0,2	-0,4	-2,5	1157,3
9	-1,3	251,4	0,2	249,3	2,0	-0,2	-0,4	-2,4	1157,2
10	-1,3	251,4	0,3	249,3	1,9	-0,3	-0,3	-2,5	1157,3
11	-1,7	251,4	0,1	249,3	2,4	-0,4	0,9	-2,6	1157,3
12	-1,6	251,3	0,2	249,3	2,3	-0,4	0,5	-2,4	1157,3
13	-1,4	251,4	0,1	249,3	2,1	-0,2	-0,2	-2,3	1157,3
14	-1,3	251,4	0,1	249,3	2,0	-0,2	-0,1	-2,3	1157,3
15	-1,3	251,4	0,1	249,3	2,0	-0,2	-0,1	-2,3	1157,3
16	-1,4	251,4	0,1	249,3	2,0	-0,3	0,1	-2,3	1157,3
Média	-1,2	251,4	0,2	249,3	1,9	-0,3	-0,1	-2,4	1157,3
DPEA	0,19	0,01	0,06	0,02	0,19	0,08	0,35	0,12	0,03

A medição dimensional do referencial previamente à sua instalação na fundação da torre sul da P25A suscitou o estudo das coordenadas mundo dos alvos entre a realização de ensaios laboratoriais e de campo, de modo a ser possível quantificar a influência do transporte e montagem neste relevante elemento do sistema de medição. Salienta-se, em particular, a sua vulnerabilidade dimensional no transporte do laboratório para a obra observada e, no caso específico da P25A, a sua deslocação desde a ancoragem sul para a fundação da torre sul através de acesso pedonal com restrições dimensionais. Os resultados das medições efetuadas antes e após deslocação à P25A são expostos no Quadro 4.29.

Quadro 4.29: Influência do transporte e montagem entre ensaios laboratoriais e de campo.

Data	Ida à P25A	Alvo 1			Alvo 2			Alvo 4		
		X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
2013-07-08	Antes	-0,7	251,3	0,3	249,0	1,4	-0,4	1,3	-2,8	1157,2
2013-07-10	Depois	0,0	251,4	-0,2	248,3	0,9	-0,1	-1,1	-1,3	1157,5
Desvio absoluto		0,7	0,1	0,5	0,7	0,5	0,3	2,4	1,5	0,3
2013-07-10	Antes	0,0	251,4	-0,2	248,3	0,9	-0,1	-1,1	-1,3	1157,5
2013-07-22	Depois	-0,7	251,3	-0,2	248,0	1,7	0,0	-0,9	-1,4	1157,5
Desvio absoluto		0,7	0,1	0,0	0,3	0,8	0,1	0,2	0,1	0,0
2014-03-12	Antes	0,6	252,5	-1,6	248,1	1,1	-1,2	-0,7	-0,7	1157,5
2014-03-19	Depois	-0,2	250,6	-1,3	248,0	0,0	-0,9	-1,3	-3,1	1157,5
Desvio absoluto		0,8	1,9	0,3	0,1	1,1	0,3	0,6	2,4	0,0

Com base nos resultados apresentados no Quadro 4.29 verifica-se que os desvios médios absolutos das coordenadas mundo do referencial, antes e após a ida à P25A, correspondem a 0,72 mm, 0,94 mm e 0,20 mm, respetivamente, para as direções *X*, *Y* e *Z* do referencial de medição. Estes resultados mostram que, por influência das operações de transporte e montagem, o referencial apresenta uma maior vulnerabilidade dimensional ao nível das direções *X* e *Y*, justificada pela ligação aparafusada entre a caixa de alojamento do alvo e a respetiva estrutura de suporte no referencial.

Salienta-se que, o cálculo da posição do centro de projeção da câmara nos ensaios de calibração e de medição de deslocamento foi suportado nas estimativas das coordenadas mundo dos alvos apresentadas no Quadro 4.29, nomeadamente:

- (i) ensaios de calibração – estimativas obtidas nos ensaios laboratoriais realizados na UMA/LNEC-EM em 2013-07-08 (época de verão) e em 2014-03-12 (época de inverno);
- (ii) ensaios de medição de deslocamento da P25A – estimativas obtidas nos ensaios laboratoriais realizados na UMA/LNEC-EM em 2013-07-10 (época de verão) e em 2014-03-19 (época de inverno).

4.6.3 Ensaio do padrão de referência

No âmbito da calibração do sistema de medição, foi desenvolvido um protótipo de padrão de referência composto por um dispositivo de transferência para montagem do referencial de medição em quatro posições de referência (inicial, longitudinal, transversal e vertical, conforme ilustrado na Figura 4.76), sendo necessário proceder à respetiva caracterização dimensional tendo em vista o julgamento da sua adequação ao processo de calibração proposto e a determinação dos valores de referência em deslocamento que suportam a comparação com os valores lidos pelo sistema de medição no ensaio de calibração.

O estudo dimensional efetuado decorreu de forma similar ao anteriormente descrito para o referencial de medição (secção 4.6.2) e abrangeu a determinação dos valores de referência, a avaliação da repetibilidade associada à montagem manual do referencial de medição no dispositivo de transferência e do desvio de retorno a zero. Neste último aspeto destaca-se a realização da operação da montagem em laboratório

por parte dos técnicos que executaram em campo a mesma operação durante a calibração *in situ*.

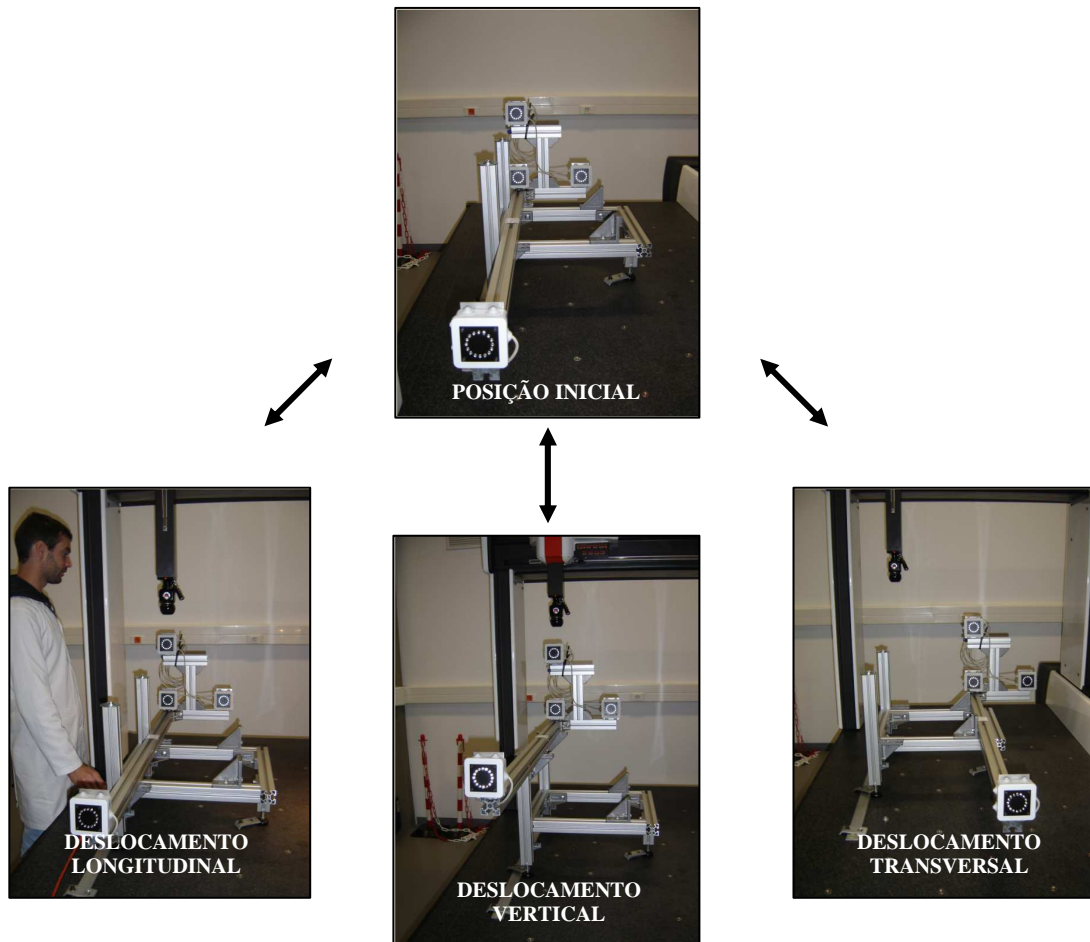


Figura 4.76: Posições de referência estudadas no dispositivo de transferência.

Os Quadros 4.30 a 4.35 apresentam os resultados das medições de deslocamento nas direções longitudinal, transversal e vertical para as duas campanhas de ensaio realizadas na P25A. Por sua vez, os Quadros 4.36 e 4.37 expõem os respectivos valores médios, desvios padrão experimentais da média e desvios médios de retorno a zero utilizados nos ensaios de calibração do sistema de medição nas épocas de verão e de inverno, respetivamente.

Quadro 4.30: Resultados das medições de deslocamento longitudinal de referência.

Campanha de medição	Id. do ensaio	Alvo 1			Alvo 2			Alvo 3			Alvo 4		
		ΔX_{ref} (mm)	ΔY_{ref} (mm)	ΔZ_{ref} (mm)	ΔX_{ref} (mm)	ΔY_{ref} (mm)	ΔZ_{ref} (mm)	ΔX_{ref} (mm)	ΔY_{ref} (mm)	ΔZ_{ref} (mm)	ΔX_{ref} (mm)	ΔY_{ref} (mm)	ΔZ_{ref} (mm)
Verão	1	0,7	0,0	-249,5	0,3	-0,5	-249,1	0,3	0,0	-249,4	-0,6	0,4	-249,3
	2	0,8	0,0	-249,6	0,3	-0,5	-249,3	0,3	0,0	-249,4	-0,5	0,5	-249,4
	3	0,8	0,0	-249,6	0,2	-0,5	-249,3	0,2	0,0	-249,4	-0,3	0,4	-249,3
	4	1,1	0,0	-249,5	0,4	-0,7	-249,2	0,4	0,0	-249,4	-0,5	0,4	-249,4
Inverno	5	1,3	-0,4	-251,8	0,5	-1,2	-251,3	0,5	-0,4	-251,6	-1,0	0,0	-251,5
	6	1,1	-0,5	-251,3	0,4	-1,0	-251,1	0,4	-0,4	-251,3	-0,2	-0,1	-251,2
	7	1,1	-0,5	-251,5	0,3	-1,1	-251,1	0,4	-0,5	-251,3	-0,6	0,0	-251,3
	8	1,1	-0,5	-251,2	0,5	-1,0	-251,0	0,5	-0,5	-251,1	-0,4	-0,1	-251,1

Quadro 4.31: Desvios de retorno a zero no deslocamento longitudinal de referência.

Campanha de medição	Id. do ensaio	Alvo 1			Alvo 2			Alvo 3			Alvo 4		
		ΔX_{ref} (mm)	ΔY_{ref} (mm)	ΔZ_{ref} (mm)	ΔX_{ref} (mm)	ΔY_{ref} (mm)	ΔZ_{ref} (mm)	ΔX_{ref} (mm)	ΔY_{ref} (mm)	ΔZ_{ref} (mm)	ΔX_{ref} (mm)	ΔY_{ref} (mm)	ΔZ_{ref} (mm)
Verão	1	-0,2	0,0	0,0	-0,1	0,1	0,0	-0,1	0,0	-0,1	-0,1	0,0	-0,1
	2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
	3	0,0	0,0	0,1	-0,1	0,0	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,0
	4	0,1	0,0	0,1	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Inverno	5	0,2	0,0	-0,2	0,1	-0,1	-0,1	0,1	0,0	-0,2	-0,6	0,0	-0,2
	6	-0,1	0,0	0,3	0,0	0,1	0,3	0,0	0,0	0,3	0,1	-0,1	0,3
	7	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2
	8	-0,1	0,0	0,2	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	-0,1	0,1

Quadro 4.32: Resultados das medições de deslocamento transversal de referência.

Campanha de medição	Id. do ensaio	Alvo 1			Alvo 2			Alvo 3			Alvo 4		
		ΔX_{ref} (mm)	ΔY_{ref} (mm)	ΔZ_{ref} (mm)	ΔX_{ref} (mm)	ΔY_{ref} (mm)	ΔZ_{ref} (mm)	ΔX_{ref} (mm)	ΔY_{ref} (mm)	ΔZ_{ref} (mm)	ΔX_{ref} (mm)	ΔY_{ref} (mm)	ΔZ_{ref} (mm)
Verão	1	349,8	0,4	0,5	350,1	0,7	-0,2	350,1	0,4	0,0	351,9	-1,3	0,1
	2	349,7	0,5	0,5	350,0	0,9	-0,3	350,1	0,5	0,1	351,9	-1,2	0,0
	3	349,5	0,7	0,3	349,9	1,2	-0,7	349,9	0,7	-0,1	352,7	-1,4	-0,1
	4	350,0	0,4	0,5	350,2	0,7	-0,3	350,2	0,4	0,1	352,0	-1,8	0,1
Inverno	5	349,2	-1,9	0,6	350,0	-1,0	0,8	350,1	-1,8	1,2	351,7	0,5	1,2
	6	349,1	-1,6	0,6	350,0	-0,7	0,5	350,0	-1,6	1,0	352,4	0,4	1,0
	7	349,1	-1,7	0,5	349,9	-0,8	0,3	350,0	-1,7	1,0	352,4	0,7	1,0
	8	349,1	-1,7	0,6	350,0	-0,8	0,5	350,0	-1,7	1,2	352,3	0,8	1,1

Quadro 4.33: Desvios de retorno a zero no deslocamento transversal de referência.

Campanha de medição	Id. do ensaio	Alvo 1			Alvo 2			Alvo 3			Alvo 4		
		ΔX_{ref} (mm)	ΔY_{ref} (mm)	ΔZ_{ref} (mm)	ΔX_{ref} (mm)	ΔY_{ref} (mm)	ΔZ_{ref} (mm)	ΔX_{ref} (mm)	ΔY_{ref} (mm)	ΔZ_{ref} (mm)	ΔX_{ref} (mm)	ΔY_{ref} (mm)	ΔZ_{ref} (mm)
Verão	1	0,1	0,0	0,1	0,0	-0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	3	-0,8	0,0	0,0	-0,4	0,5	0,0	-0,4	0,0	0,1	0,8	-0,1	0,2
	4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Inverno	5	-0,1	0,0	1,0	-0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
	6	-0,1	0,0	-0,1	-0,1	0,0	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0
	7	-0,1	0,0	-0,1	0,0	0,1	-0,2	0,0	0,0	-0,1	0,5	-0,3	-0,1
	8	0,3	0,0	0,1	0,0	-0,2	-0,2	0,0	0,0	0,0	0,6	-0,3	0,1

Quadro 4.34: Resultados das medições de deslocamento vertical de referência.

Campanha de medição	Id. do ensaio	Alvo 1			Alvo 2			Alvo 3			Alvo 4		
		ΔX_{ref} (mm)	ΔY_{ref} (mm)	ΔZ_{ref} (mm)	ΔX_{ref} (mm)	ΔY_{ref} (mm)	ΔZ_{ref} (mm)	ΔX_{ref} (mm)	ΔY_{ref} (mm)	ΔZ_{ref} (mm)	ΔX_{ref} (mm)	ΔY_{ref} (mm)	ΔZ_{ref} (mm)
Verão	1	-0,7	250,8	0,3	-0,8	250,6	0,2	-0,9	250,8	0,0	-1,3	249,5	0,0
	2	-0,5	250,7	0,4	-0,8	250,5	0,4	-0,8	250,7	0,2	-2,0	249,7	0,2
	3	-0,5	250,6	0,3	-1,0	250,2	0,1	-0,9	250,6	0,0	-1,4	249,7	-0,1
	4	-0,6	250,8	0,4	-0,9	250,5	0,2	-0,9	250,8	0,1	-1,0	249,5	0,1
Inverno	5	1,4	251,6	-0,6	1,2	251,5	1,4	1,2	251,6	0,4	-0,3	251,5	0,4
	6	1,6	251,6	0,0	1,2	251,2	0,6	1,2	251,6	0,1	-0,8	251,3	0,0
	7	1,5	251,6	0,3	1,2	251,4	0,9	1,2	251,6	0,1	-2,3	251,3	0,1
	8	1,6	251,4	0,3	1,3	251,3	1,0	1,4	251,4	0,3	-1,6	251,3	0,3

Quadro 4.35: Desvios de retorno a zero no deslocamento vertical de referência.

Campanha de medição	Id. do ensaio	Alvo 1			Alvo 2			Alvo 3			Alvo 4		
		ΔX_{ref} (mm)	ΔY_{ref} (mm)	ΔZ_{ref} (mm)	ΔX_{ref} (mm)	ΔY_{ref} (mm)	ΔZ_{ref} (mm)	ΔX_{ref} (mm)	ΔY_{ref} (mm)	ΔZ_{ref} (mm)	ΔX_{ref} (mm)	ΔY_{ref} (mm)	ΔZ_{ref} (mm)
Verão	1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	-0,1	0,0	-0,1	0,1	0,0	0,0
	2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	3	0,2	0,0	-0,2	0,1	-0,1	-0,2	0,1	0,0	-0,2	-0,2	0,1	-0,2
	4	-0,2	0,0	0,0	-0,1	0,0	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0
Inverno	5	0,2	0,0	-1,2	0,1	-0,1	0,1	0,1	0,0	-0,1	-1,1	0,3	-0,2
	6	0,5	0,0	-0,1	0,2	-0,1	-0,1	0,2	0,1	-0,2	0,1	0,0	-0,2
	7	0,2	0,0	-0,4	0,1	-0,1	-0,3	0,0	0,0	-0,4	-0,2	0,1	-0,3
	8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0

Quadro 4.36: Resumo de deslocamentos de referência para ensaio de calibração no verão.

Direção do deslocamento		ΔX_{ref} (mm)	ΔY_{ref} (mm)	ΔZ_{ref} (mm)
Longitudinal	Valor médio	0,23	-0,02	-249,39
	Desvio padrão experimental da média	0,27	0,20	0,07
	Desvio médio de retorno a zero	-0,04	-0,01	0,01
Transversal	Valor médio	350,49	0,12	0,02
	Desvio padrão experimental da média	0,55	0,52	0,17
	Desvio médio de retorno a zero	0,04	0,03	0,03
Vertical	Valor médio	-0,94	250,38	0,16
	Desvio padrão experimental da média	0,18	0,27	0,07
	Desvio médio de retorno a zero	0,01	0,00	-0,07

Quadro 4.37: Resumo de deslocamentos de referência para ensaio de calibração no inverno.

Direção do deslocamento		ΔX_{ref} (mm)	ΔY_{ref} (mm)	ΔZ_{ref} (mm)
Longitudinal	Valor médio	0,04	-0,51	-251,29
	Desvio padrão experimental da média	0,34	0,21	0,07
	Desvio médio de retorno a zero	-0,01	-0,01	0,11
Transversal	Valor médio	350,33	-0,91	0,82
	Desvio padrão experimental da média	0,65	0,54	0,15
	Desvio médio de retorno a zero	0,07	-0,04	0,04
Vertical	Valor médio	0,69	251,44	0,35
	Desvio padrão experimental da média	0,65	0,06	0,21
	Desvio médio de retorno a zero	0,02	0,00	-0,21

Nos resultados obtidos salienta-se que, as diferenças encontradas entre estimativas dos deslocamentos de referência nas épocas de verão e de inverno são justificadas por montagens distintas dos elementos constituintes do dispositivo de transferência nas duas épocas referidas. Em regra, a magnitude dos desvios de retorno a zero obtida apresenta uma ordem de grandeza sub-milimétrica decorrente da fixação manual do referencial de medição nas posições de referência do dispositivo de transferência. No que respeita ao desvio-padrão experimental do valor médio de deslocamento notam-se, em ambas as épocas analisadas, valores mais elevados ao nível do deslocamento transversal nas direções X e Y em virtude de um maior desalinhamento relativo dos alvos nas direções mencionadas anteriormente. A redução desta componente de incerteza implica um maior rigor no processo de montagem dos elementos constituintes do dispositivo de transferência com impacto nas respetivas posições de referência intervenientes neste tipo de deslocamento.

4.6.4 Calibração do sistema de medição

4.6.4.1 *Descrição do ensaio e do processo de cálculo*

Conforme proposto no sub-capítulo 3.9, a calibração do sistema de medição foi concretizada através da realização de um ensaio de campo na P25A. A configuração geométrica adotada foi idêntica à indicada na secção 4.5.2 para os ensaios de feixe errante por turbulência atmosférica, ou seja, posicionamento da câmara na ancoragem sul e do referencial de medição (instalado no dispositivo de transferência) na fundação da torre sul, conforme ilustrado na Figura 4.77.

Neste âmbito foram efetuados dois ensaios de calibração em épocas distintas – no verão em 2013-07-09 e no inverno em 2014-03-18 – e cujos resultados se apresentam nas secções seguintes (4.6.4.2 e 4.6.4.3, respetivamente). Em cada ensaio foi promovida a aquisição de sete imagens individuais do referencial de medição em diferentes posições de referência no dispositivo de transferência de acordo com a seguinte sequência: posição inicial, deslocamento longitudinal, retorno a posição inicial, deslocamento transversal, retorno a posição inicial, deslocamento vertical e retorno a posição inicial. No processo de aquisição de imagens mencionado, foram estabelecidos os parâmetros operacionais referidos no Quadro 4.38 no que respeita à câmara e aos alvos ativos do sistema de medição.

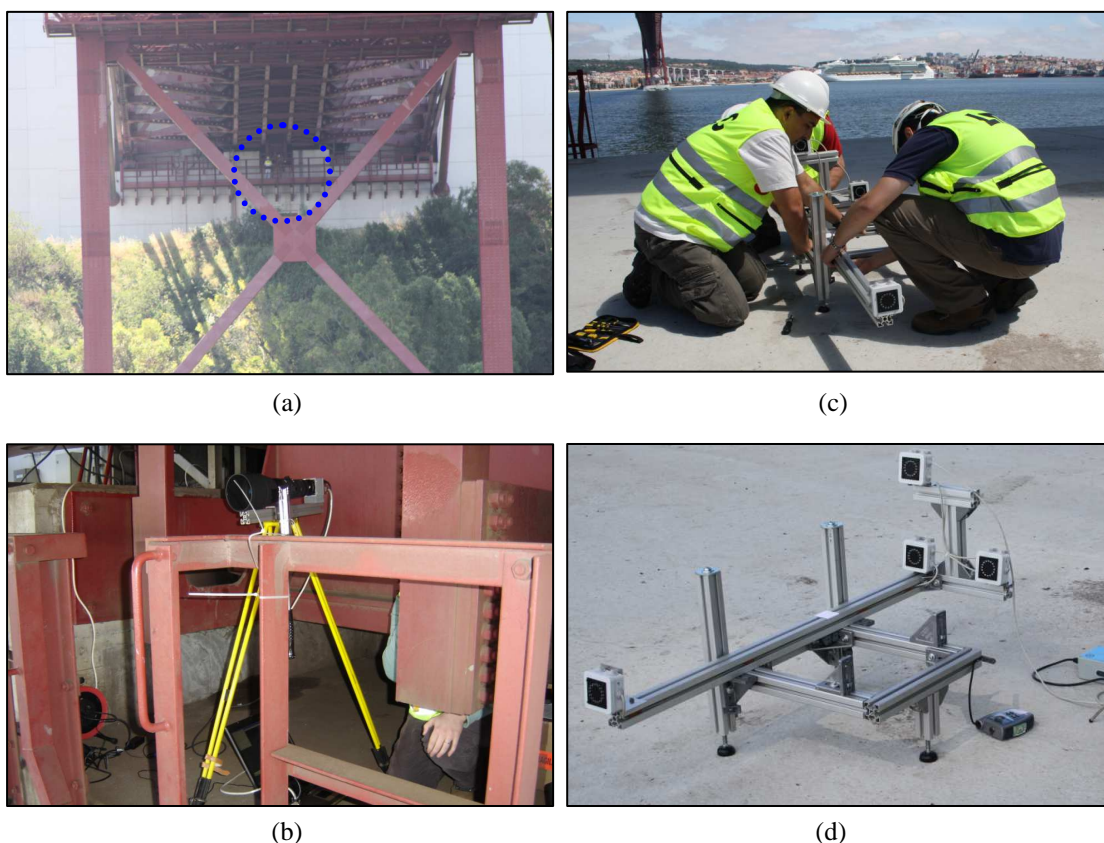


Figura 4.77: (a) Ancoragem sul da P25A; (b) Câmara no tripé de observação na ancoragem sul; (c) Montagem do referencial no dispositivo de transferência na fundação da torre sul; (d) Referencial de medição em posição longitudinal de calibração.

Quadro 4.38: Parâmetros operacionais do sistema durante ensaios de calibração.

Época do ano	Abertura da câmara	Tempo de exposição	Posição de focagem	Filtro óptico	Intensidade de corrente nos alvos
Verão	$f/32$	15 ms	∞	Passa-alto	300 mA
Inverno	$f/5,6$	2,5 ms	Posição A		

O processamento digital individual das imagens adquiridas (idêntico ao descrito na secção 4.5.2 relativa aos ensaios de feixe errante) consistiu nas seguintes etapas sequenciais: (i) operação de *thresholding* suportada no número digital associado aos alvos; (ii) transformação morfológica de fecho (erosão após dilatação, com elemento estruturante tipo disco) da imagem binária obtida na etapa anterior e determinação dos centróides dos alvos; (iii) criação de sub-imagem com o conjunto de alvos, seguida de determinação de contorno e ajuste de elipses aos alvos e determinação dos respetivos centros geométricos.

As estimativas das coordenadas imagem dos alvos constituintes do referencial de medição foram aplicadas, em conjunto com as restantes estimativas das grandezas de entrada (distância focal, coordenadas imagem do ponto principal, coordenadas mundo dos alvos), num processo de otimização não-linear visando a minimização dos resíduos entre coordenadas imagem dos alvos medidas e calculadas através do sistema de equações de colinearidade (sem distorção radial, conforme discutido no sub-capítulo 4.4).

Este processo de cálculo foi concretizado num algoritmo desenvolvido em ambiente MATLAB[®], nomeadamente com recurso à função *fminsearch* dedicada à otimização não-linear, como é o caso das equações de colinearidade. Esta função implementa o algoritmo *simplex* Nelder-Mead conforme descrito por [Lagarias (1998)], o qual visa a determinação de mínimo em função multivariável não-constrangida usando um método de procura direta sem recorrer ao cálculo de gradientes analíticos ou numéricos.

Sendo n a dimensão do vetor de incógnitas do problema estudado, um *simplex* num espaço com dimensão n é caracterizado por $n + 1$ vetores distintos dando origem a vértices de tal forma que, num espaço bidimensional o *simplex* possui uma forma triangular enquanto que num espaço tridimensional apresenta a forma de uma pirâmide. Em cada iteração do processo de otimização, um novo ponto é gerado no *simplex* atual ou na sua proximidade, promovendo-se a comparação do valor da função no novo ponto com os valores da função obtidos nos vértices do *simplex*. Em regra, um dos vértices é substituído pelo novo ponto dando origem a um novo *simplex* e as etapas anteriores repetem-se até o seu diâmetro ser menor do que o especificado pela tolerância definida para o problema em estudo [MATLAB (2010)].

A resolução do sistema não-linear de equações de colinearidade através de processo de otimização foi suportada nas seguintes definições:

- (i) vetor de incógnitas com dimensão igual a seis – três coordenadas (X_0, Y_0, Z_0) relativas ao posicionamento tridimensional do centro de projeção da câmara e três ângulos de Euler (ω, φ, κ) associados à orientação espacial da câmara;
- (ii) valores iniciais das incógnitas baseados na configuração geométrica nominal do sistema de medição em ensaio de calibração ($X_0 = 0$ m, $Y_0 = 61$ m, $Z_0 = 582$ m, $\omega = -0,11$ rad, $\varphi = 3,14$ rad, $\kappa = 0$ rad);

- (iii) função objetivo correspondendo ao quadrado da norma do vetor de resíduos entre coordenadas imagem dos alvos medidas e calculadas;
- (iv) critério de paragem definido por uma tolerância igual a 10^{-6} píxel² associada ao valor da função objetivo numa dada iteração.

O algoritmo foi validado com valores de referência e a sua aplicação a dados reais não revelou problemas de instabilidade numérica, fornecendo soluções convergentes para as incógnitas mencionadas.

4.6.4.2 Resultados da calibração em época de verão

O ensaio de calibração do sistema de medição desenvolvido para a P25A foi efetuado em época de verão (em 2013-07-18) em condições ambientais desfavoráveis, nomeadamente, no que diz respeito à temperatura do ar junto à fundação da torre sul, conforme se pode constatar nas Figuras 4.78 e 4.79 e à ausência de sombra sobre os alvos. O Quadro 4.39 resume as medições de condições ambientais mais relevantes no instante de aquisição de cada uma das imagens dos alvos nas diferentes posições de referência estudadas, cuja representação parcial se apresenta na Figura 4.80. Menciona-se, igualmente, a ausência de cobertura de nuvens durante a operação de calibração.

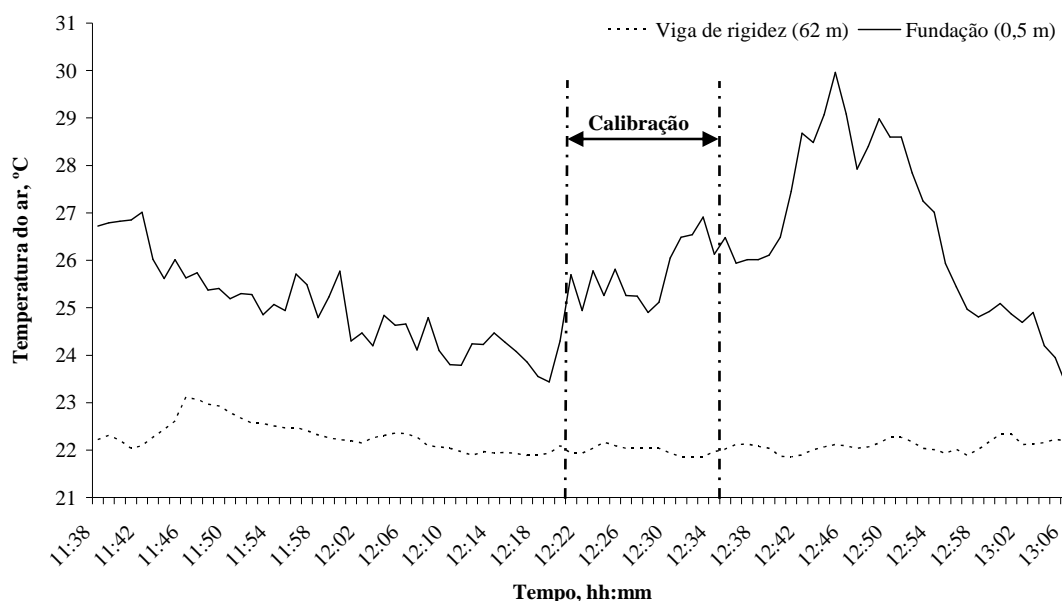


Figura 4.78: Evolução da temperatura do ar durante o ensaio de calibração no verão.

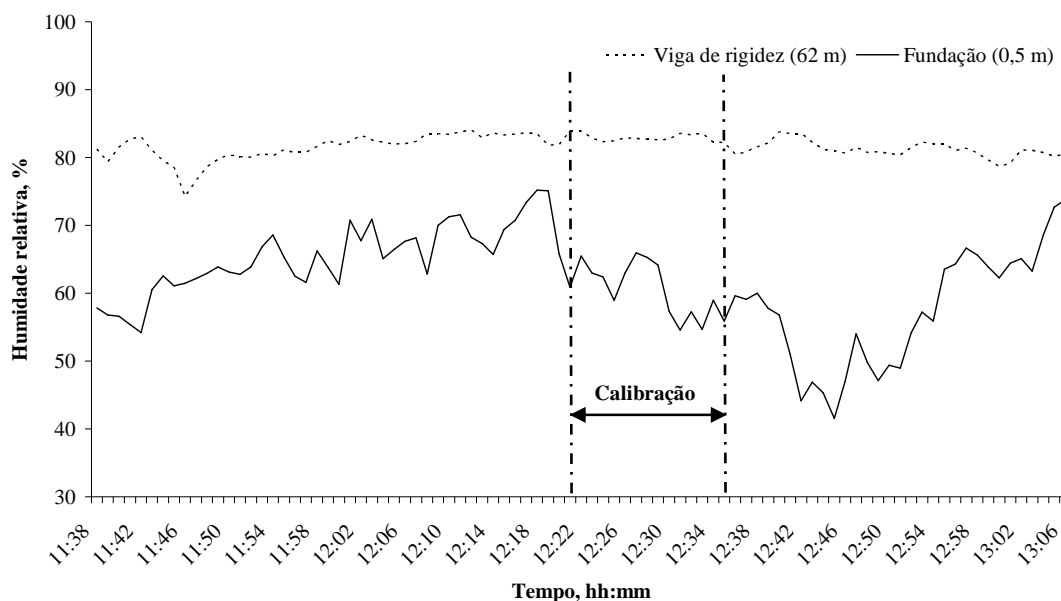


Figura 4.79: Evolução da humidade relativa durante o ensaio de calibração no verão.

Quadro 4.39: Condições ambientais registadas durante o ensaio de calibração no verão.

Hora	Imagem adquirida	Ancoragem sul				Fundação da torre sul			
		θ (°C)	hr (%)	v_{vento} (m·s ⁻¹)	Direção do vento	θ (°C)	hr (%)	v_{vento} (m·s ⁻¹)	Direção do vento
12:22	Posição inicial	21,9	84,0	0,9	Noroeste	24,6	64,7	2	Noroeste
12:25	Deslocamento longitudinal	22,0	82,9	0,6		25,6	61,4	7	
12:26	Retorno à pos. inicial	22,0	83,0	2,5		25,5	61,4	6	
12:28	Deslocamento transversal	21,9	83,1	1,4		25,6	62,7	6	
12:31	Retorno à pos. inicial	21,8	83,9	1,8		24,7	66,8	5	
12:34	Deslocamento vertical	21,9	82,5	1,1		26,3	55,2	6	
12:36	Retorno à pos. inicial	22,0	81,1	1,9		26,7	55,3	6	

Nos Quadros 4.40 a 4.42 são apresentados os resultados do ensaio de calibração realizado nas três direções de deslocamento analisadas, nomeadamente, as coordenadas mundo do centro de projeção da câmara nas posições ensaiadas, os valores lidos de deslocamento, bem como os desvios de calibração e de retorno a zero. Salienta-se que os valores de deslocamento apresentados apresentam sinal oposto ao obtido nos respetivos ensaios dimensionais laboratoriais (*vide* Quadros 4.36 e 4.37 da secção 4.6.3) em virtude do sentido de deslocamento virtual da câmara no ensaio de calibração.

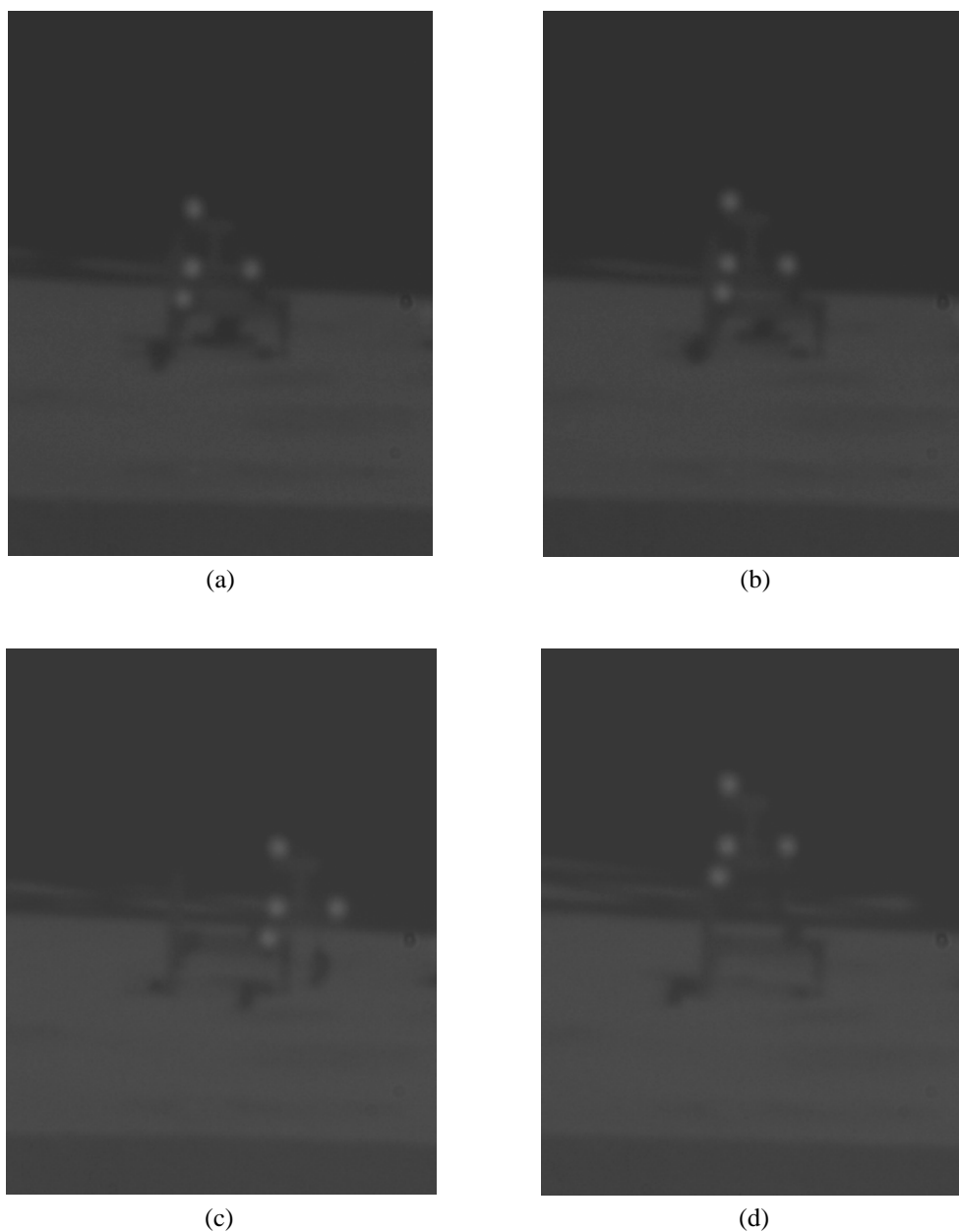


Figura 4.80: Alvos nas posições de ref.: (a) inicial; (b) longitudinal; (c) transversal; (d) vertical.

Quadro 4.40: Resultados do ensaio de calibração no verão – deslocamento longitudinal.

Coordenadas mundo do centro de projeção da câmara	X_0 (m)	Y_0 (m)	Z_0 (m)
Posição inicial	0,540	62,352	582,51
Posição final	0,540	62,352	582,76
Retorno a zero	0,537	62,347	582,51
Valor lido de deslocamento (mm)	0	0	250
Deslocamento de referência (mm)	-0,2	0,0	249,4
Desvio de calibração (mm)	0,2	0,0	0,6
Desvio de retorno a zero (mm)	-3	-5	0

Quadro 4.41: Resultados do ensaio de calibração no verão – deslocamento transversal.

Coordenadas mundo do centro de projeção da câmara	X_0 (m)	Y_0 (m)	Z_0 (m)
Posição inicial	0,537	62,347	582,51
Posição final	0,190	62,350	582,51
Retorno a zero	0,540	62,352	582,51
Valor lido de deslocamento (mm)	-347	2	0
Deslocamento de referência (mm)	-350,5	-0,1	0,0
Desvio de calibração (mm)	3,5	2,1	0,0
Desvio de retorno a zero (mm)	3	5	0

Quadro 4.42: Resultados do ensaio de calibração no verão – deslocamento vertical.

Coordenadas mundo do centro de projeção da câmara	X_0 (m)	Y_0 (m)	Z_0 (m)
Posição inicial	0,540	62,352	582,51
Posição final	0,540	62,098	582,51
Retorno a zero	0,540	62,352	582,51
Valor lido de deslocamento (mm)	0	-254	0
Deslocamento de referência (mm)	0,9	-250,4	-0,2
Desvio de calibração (mm)	-0,9	-3,6	0,2
Desvio de retorno a zero (mm)	0	0	0

Os desvios de calibração obtidos no ensaio realizado apresentam uma magnitude milimétrica nos casos dos deslocamentos transversal e vertical (valores máximos de 3,5 mm e 3,6 mm, respetivamente, nas direções X e Y de deslocamento) e uma magnitude sub-milimétrica no deslocamento longitudinal. Este último facto mencionado não indicia uma maior exatidão de medição do deslocamento longitudinal mas traduz a reduzida sensibilidade do sistema de medição na referida direção em virtude do alinhamento da câmara com o referencial. Esta constatação é igualmente verificada nos restantes deslocamentos analisados (transversal e vertical), onde os desvios de calibração na direção Z são igualmente reduzidos (0,0 mm e 0,2 mm, respetivamente).

No que respeita aos desvios de retorno a zero, apenas no caso do deslocamento vertical foi possível obter valores nulos, bem como na direção Z dos restantes deslocamentos analisados confirmando, novamente, a reduzida sensibilidade do sistema de medição naquela direção. De facto, nos deslocamentos longitudinal e transversal observam-se desvios de retorno a zero iguais em valor absoluto nas direções X e Y (3 mm e 5 mm, respetivamente). Como a imagem de retorno à posição

inicial no deslocamento longitudinal corresponde à imagem de posição inicial no deslocamento transversal, os desvios de retorno a zero referidos mostram o incorreto posicionamento do referencial no dispositivo de transferência na operação de retorno efetuada.

Por motivos logísticos, no ensaio de calibração realizado não foi possível dispor de perfis verticais instrumentados para medição termohigrométrica na fundação da torre sul, em simultâneo com o processo de aquisição de imagem, de modo a ser possível estimar as correções de refração atmosférica aplicáveis às coordenadas mundo verticais dos alvos observados, conforme se discutiu na secção 4.5.1.

Tendo em conta o valor médio da temperatura do ar observada na fundação da torre sul (em torno de 26 °C) no intervalo de tempo de realização do ensaio adotou-se, como primeira aproximação, o modelo não-linear do índice de refração obtido nos ensaios termohigrométricos realizados naquela região em 2013-06-05 às 15:00, em que se verificou uma temperatura média do ar de, aproximadamente, 27 °C. Embora constitua um modelo aproximado, pretendeu-se avaliar se as correções previstas pela abordagem geodésica contribuem para uma redução dos desvios verticais de calibração referidos anteriormente. O Quadro 4.43 apresenta as estimativas das correções (a somar às coordenadas mundo verticais) obtidas com base no correspondente modelo não-linear do índice de refração para as diferentes posições verticais dos alvos em relação à superfície da fundação durante o ensaio de calibração.

Quadro 4.43: Correções de refração vertical no ensaio de calibração no verão.

Id. do alvo	Posições inicial, longitudinal e transversal		Posição vertical	
	Altura em relação à superfície da fundação	Correção de refração vertical	Altura em relação à superfície da fundação	Correção de refração vertical
1	0,57 m	6,4 mm	0,82 m	4,5 mm
2				
3			0,57 m	6,4 mm
4				

As estimativas obtidas foram aplicadas às coordenadas mundo verticais dos alvos nas posições de referência observadas, tendo-se repetido o processo de otimização da posição espacial do centro de projeção da câmara. Os desvios de calibração obtidos antes e após correção do efeito de refração vertical são apresentados na Figura 4.81.

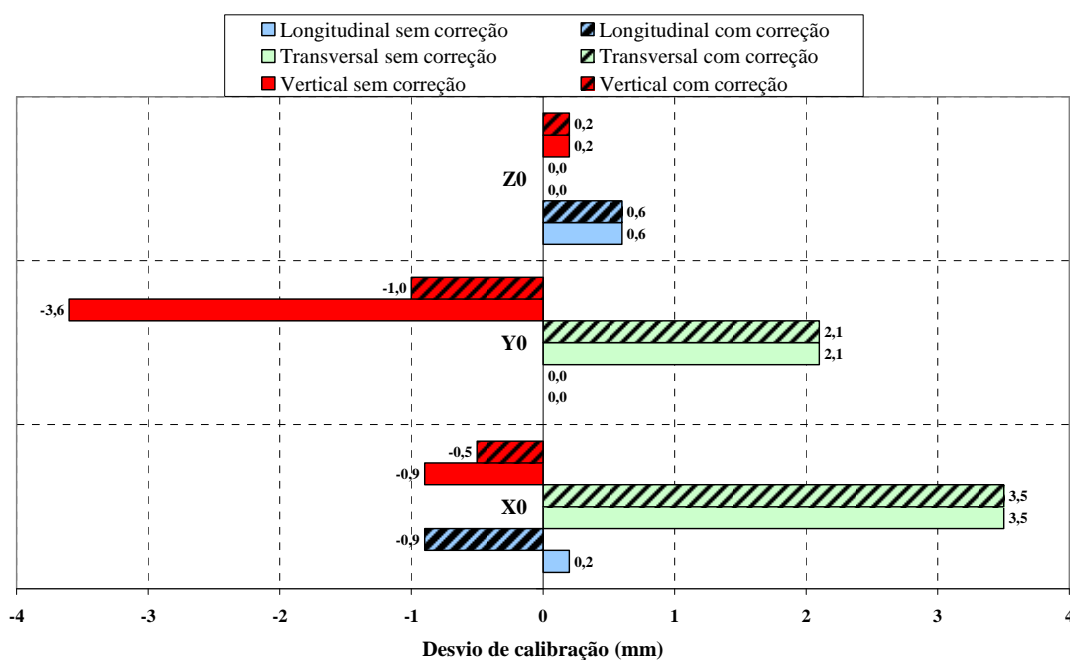


Figura 4.81: Aplicação de correção de refração vertical nos desvios de calibração na época de verão.

Os resultados obtidos mostram que os desvios de calibração permanecem inalterados com a aplicação da correção de refração vertical, exceto no caso do desvio na direção *Y* nos deslocamentos vertical e transversal, nos quais diminui de -3,6 mm para apenas -1,0 mm e de -0,9 mm para -0,5 mm, respetivamente, validando a aproximação realizada com a abordagem geodésica e o modelo de índice de refração vertical aplicados neste cenário de observação da P25A. Contudo, no caso da direção *X* do deslocamento longitudinal, a aplicação da correção de refração vertical conduziu a um ligeiro acréscimo (cerca de 0,7 mm) do valor absoluto de desvio de calibração, o qual não possui um impacto relevante na medição do deslocamento longitudinal visto apresentar uma magnitude inferior à sensibilidade do sistema de medição naquela direção.

4.6.4.3 Resultados de calibração em época de inverno

O ensaio de calibração do sistema de medição foi repetido em época de inverno (em 2014-03-18) em condições ambientais favoráveis, sobretudo, no que respeita à temperatura do ar junto à fundação da torre sul e à existência de sombra sobre os alvos. Pretende-se, deste modo, avaliar o impacto deste tipo de condições ambientais nos desvios de calibração produzidos, sendo possível efetuar uma comparação relativamente aos resultados descritos anteriormente para a época de verão.

As Figuras 4.82 e 4.83 mostram a evolução da temperatura e humidade relativa do ar junto às regiões de interesse (fundação da torre sul e ancoragem sul) durante a realização do ensaio de calibração, no qual não se verificou a ocorrência de cobertura de nuvens.

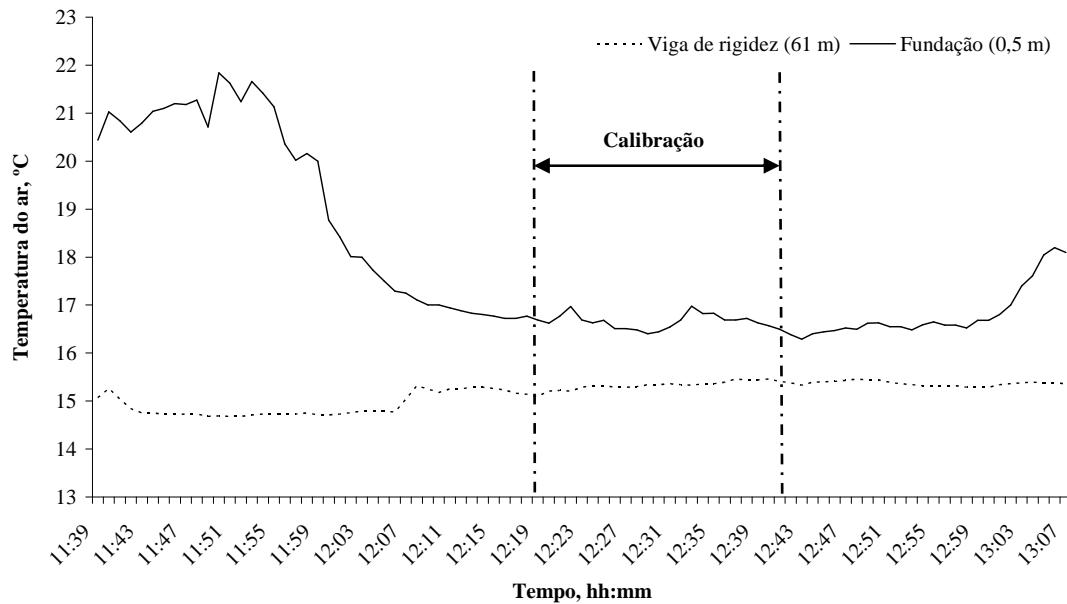


Figura 4.82: Evolução temporal da temperatura do ar durante ensaio de calibração no inverno.

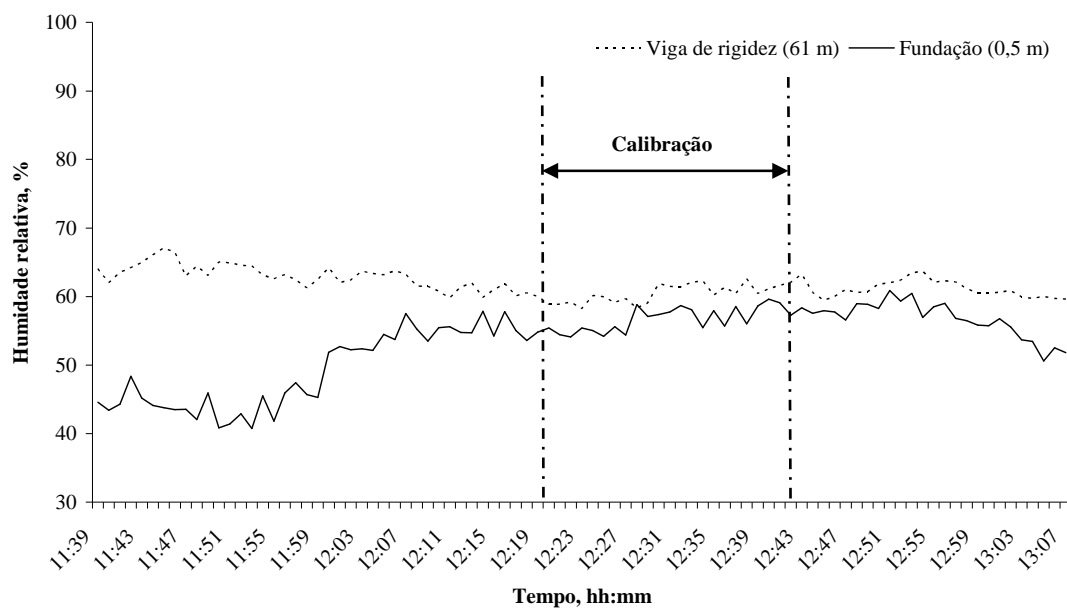


Figura 4.83: Evolução temporal da humidade relativa durante ensaio de calibração no inverno.

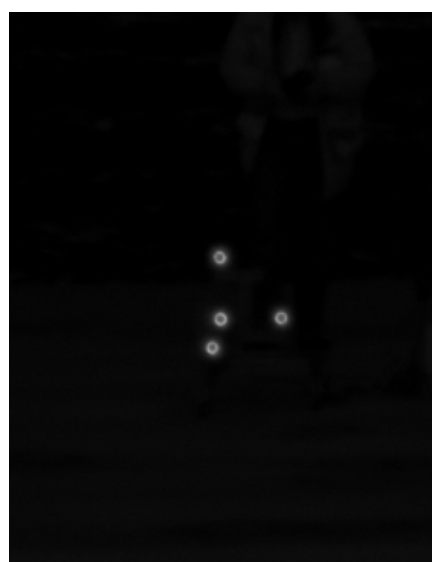
Comparativamente com o ensaio realizado na época de verão (*vide* Figuras 4.78 e 4.79), as condições ambientais foram efetivamente mais favoráveis no que respeita à estabilidade termohigrométrica, à magnitude térmica global do cenário de observação, à velocidade do vento, bem como ao gradiente térmico vertical entre a fundação e a ancoragem. O Quadro 4.44 resume as medições de condições ambientais mais relevantes no instante de aquisição de cada uma das imagens dos alvos nas diferentes posições de referência estudadas, cuja representação parcial se apresenta na Figura 4.84.

Quadro 4.44: Condições ambientais registadas no ensaio de calibração no inverno.

Hora	Imagem adquirida	Ancoragem sul				Fundação da torre sul			
		θ (°C)	hr (%)	v_{vento} (m·s ⁻¹)	Direção do vento	θ (°C)	hr (%)	v_{vento} (m·s ⁻¹)	Direção do vento
12:20	Posição inicial	15,1	61,0	0,9	Norte	16,7	54,1	4	Norte
12:23	Deslocamento longitudinal	15,3	58,2	0,5		16,7	55,4	4	
12:27	Retorno à pos. inicial	15,2	59,9	0,0		16,6	54,5	4	
12:30	Deslocamento transversal	15,3	60,0	0,6		16,5	57,5	4	
12:33	Retorno à pos. inicial	15,3	61,3	0,5		16,4	64,4	4	
12:37	Deslocamento vertical	15,3	62,3	0,7		16,8	56,3	5	
12:42	Retorno à pos. inicial	15,4	60,9	0,9		16,6	58,4	5	



(a)



(b)

Figura 4.84: Alvos em posições de referência: (a) inicial; (b) longitudinal.

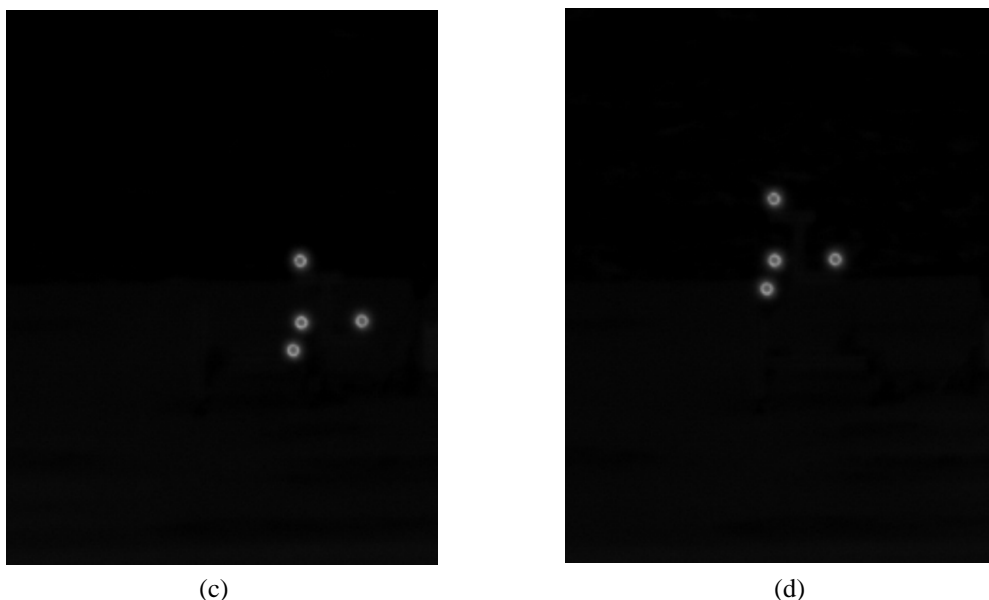


Figura 4.84: Alvos em posições de referência: (c) transversal; (d) vertical.

Nos Quadros 4.45 a 4.47 são expostos os resultados do ensaio de calibração realizado na P25A, nomeadamente, as coordenadas mundo do centro de projeção nas posições de referência com interesse, os valores lido e de referência dos deslocamentos, bem como os desvios de calibração e de retorno a zero.

Quadro 4.45: Resultados do ensaio de calibração no inverno – deslocamento longitudinal.

Coordenadas mundo do centro de projeção da câmara	X_0 (m)	Y_0 (m)	Z_0 (m)
Posição inicial	0,540	62,349	582,51
Posição final	0,540	62,350	582,76
Retorno a zero	0,540	62,349	582,51
Valor lido de deslocamento (mm)	0	1	250
Deslocamento de referência (mm)	0,0	0,5	251,3
Desvio de calibração (mm)	0	0,5	-1,3
Desvio de retorno a zero (mm)	0	0	0

Quadro 4.46: Resultados do ensaio de calibração no inverno – deslocamento transversal.

Coordenadas mundo do centro de projeção da câmara	X_0 (m)	Y_0 (m)	Z_0 (m)
Posição inicial	0,54	62,349	582,51
Posição final	0,19	62,350	582,51
Retorno a zero	0,54	62,350	582,51
Valor lido de deslocamento (mm)	-350	2	0
Deslocamento de referência (mm)	-350,3	0,9	-0,8
Desvio de calibração (mm)	0,3	1,1	0,8
Desvio de retorno a zero (mm)	0	1	0

Quadro 4.47: Resultados do ensaio de calibração no Inverno – deslocamento vertical.

Coordenadas mundo do centro de projeção da câmara	X_0 (m)	Y_0 (m)	Z_0 (m)
Posição inicial	0,540	62,350	582,51
Posição final	0,538	62,099	582,51
Retorno a zero	0,540	62,349	582,51
Valor lido de deslocamento (mm)	-2	-251	0
Deslocamento de referência (mm)	-0,7	-251,4	-0,4
Desvio de calibração (mm)	-1,3	0,4	0,4
Desvio de retorno a zero (mm)	0	1	0

Os resultados obtidos mostram que os desvios de calibração apresentam, na sua maioria, uma magnitude sub-milimétrica, com excepção dos valores máximos de -1,3 mm nas direcções Z e X nos deslocamentos longitudinal e vertical, respetivamente, e de 1,1 mm na direcção Y no deslocamento transversal. Comparativamente com os resultados obtidos na época de verão, os desvios de calibração obtidos em época de inverno são bastante inferiores, o que poderá ser justificado por: (i) condições ambientais de observação mais favoráveis, conforme discutido no início da secção; (ii) melhor qualidade de imagem dos alvos no que respeita a resolução espacial, em virtude de maior abertura na câmara e menor tempo de exposição do sensor de imagem; (iii) maior experiência dos técnicos envolvidos na montagem manual do referencial de medição no dispositivo de transferência, conforme se nota nos desvios residuais obtidos nas operações de retorno à posição inicial (valor máximo absoluto de 5 mm na primeira campanha no verão e de 1 mm na segunda campanha no inverno).

Neste ensaio de calibração também se utilizou, como primeira aproximação, o modelo não-linear do índice de refração vertical obtido nesta região da P25A em 2014-03-26 às 15:50, em que se verificou uma temperatura média do ar em torno de 17 °C, ligeiramente afastada em relação ao valor registado durante o ensaio de calibração (cerca de 14 °C).

O Quadro 4.48 refere as correções obtidas por aplicação da abordagem geodésica observando-se, na Figura 4.85, o respetivo efeito produzido nos desvios de calibração obtidos.

Quadro 4.48: Correções de refração vertical no ensaio de calibração no inverno.

Id. do alvo	Posições inicial, longitudinal e transversal		Posição vertical	
	Altura em relação à superfície da fundação	Correção de refração vertical	Altura em relação à superfície da fundação	Correção de refração vertical
1	0,57 m	0,61 mm	0,82 m	0,43 mm
2	0,32 m	1,07 mm	0,57 m	0,61 mm
3				
4				

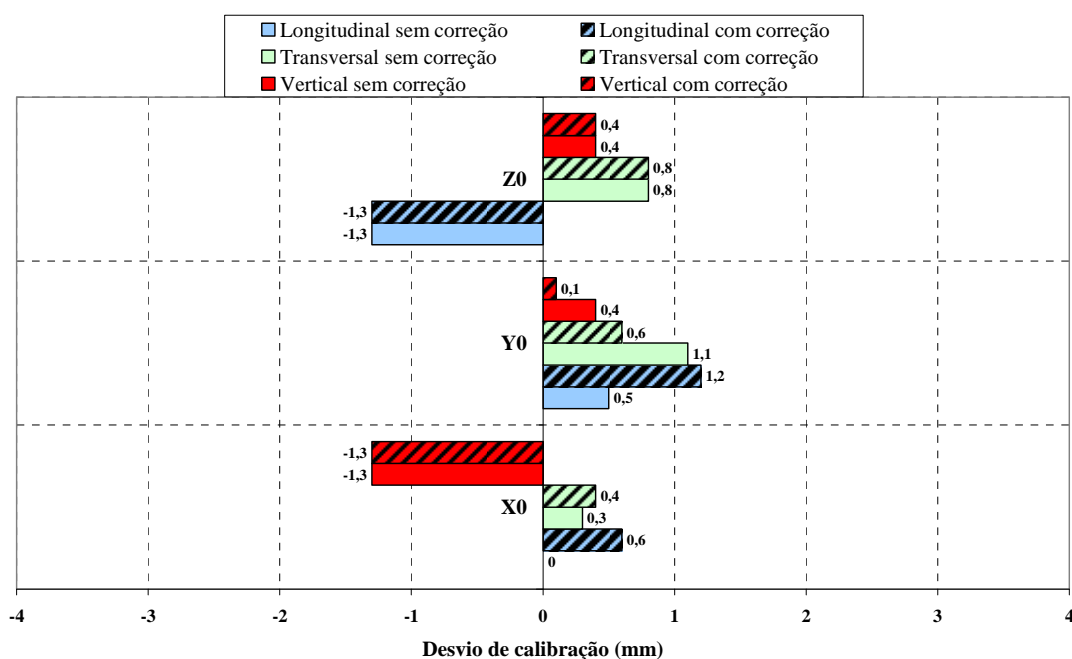


Figura 4.85: Aplicação de correção de refração vertical nos desvios de calibração na época de inverno.

A aplicação de correções de refração vertical mostrou ter impacto no desvio de calibração obtido na direção *Y* nos deslocamentos vertical e transversal – reduções de 0,4 mm para 0,1 mm e de 1,1 mm para 0,6 mm, respetivamente – evidenciando, à semelhança do que já tinha sido constatado em época de verão, que a abordagem geodésica e a aproximação do modelo do índice de refração vertical aplicados são adequados para a mitigação do efeito sistemático da refração atmosférica vertical. No que se refere ao deslocamento longitudinal, nota-se um pequeno acréscimo do desvio de calibração produzido nas direções *X* e *Y*, contudo inferior à sensibilidade de medição do sistema óptico nesse tipo de deslocamento.

4.7 Avaliação de incertezas de medição

4.7.1 Introdução

Neste sub-capítulo é descrita a abordagem funcional de propagação de incertezas de medição das grandezas de entrada até às grandezas de saída do processo de calibração do sistema de medição, cuja representação esquemática se apresenta na Figura 4.86.

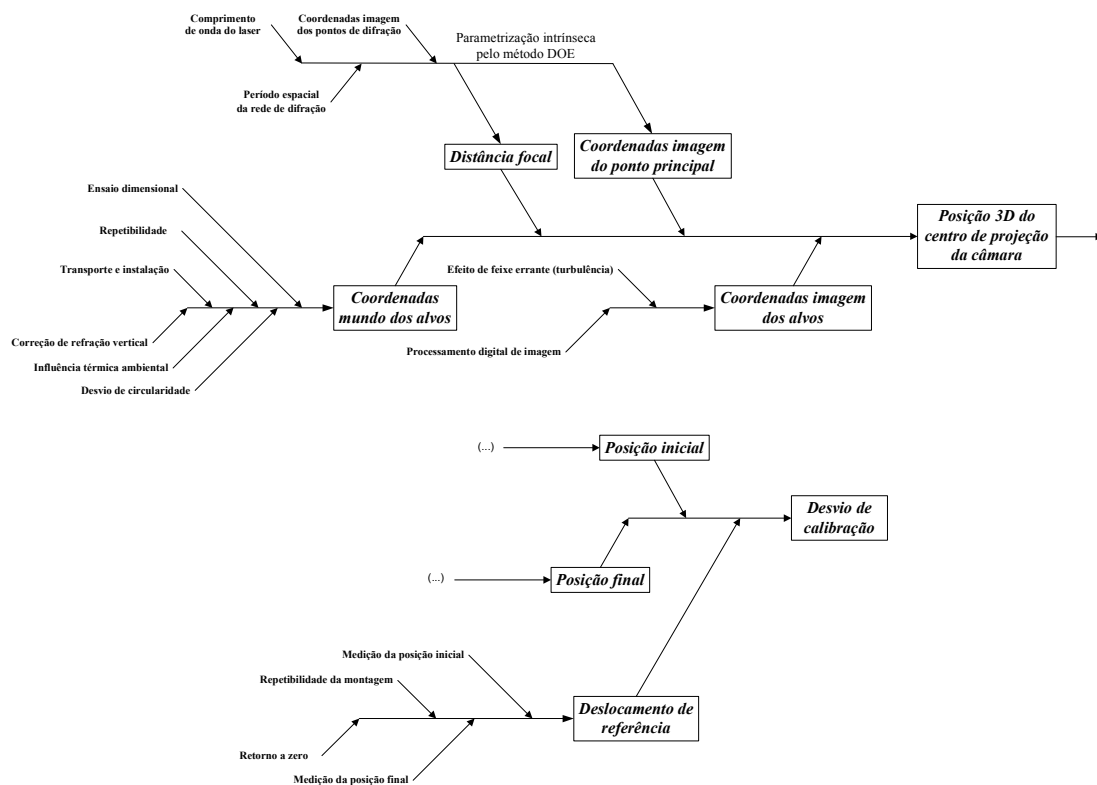


Figura 4.86: Propagação de incertezas de medição no processo de calibração do sistema de medição.

De acordo com o diagrama apresentado, a propagação de incertezas de medição apresenta três estágios sequenciais distintos:

- (i) o estágio inicial, associado às grandezas de entrada cujas estimativas suportam a determinação da posição do centro de projeção da câmara num dado instante de tempo – parâmetros intrínsecos, onde se incluem as grandezas distância focal e coordenadas imagem do ponto principal, coordenadas mundo e imagem dos alvos – e, também, o deslocamento de referência numa dada direção do dispositivo de transferência, com o qual se compara o valor de deslocamento determinado pelo sistema de medição;

- (ii) o estágio intermédio, onde se identifica a grandeza posição espacial do centro de projeção da câmara em dois instantes de tempos consecutivos, entre os quais se pretende determinar o seu deslocamento virtual;
- (iii) o estágio final, envolvendo o desvio de calibração obtido pela diferença entre valores de deslocamento lido e de referência.

Nas secções seguintes é descrita a formulação probabilística das referidas grandezas de entrada no estágio inicial (secção 4.7.2) e a respetiva propagação para o estágio intermédio (secção 4.7.3) e posteriormente para o estágio final (secção 4.7.4).

4.7.2 Estágio inicial

4.7.2.1 Parâmetros intrínsecos

O estudo de avaliação de incertezas de medição associadas aos parâmetros intrínsecos da câmara encontra-se descrito, em detalhe, no sub-capítulo 4.4 dedicado à parametrização intrínseca pelo método DOE. Tendo em conta o nível de exatidão associado à localização dos centros geométricos [Shortis (1994)] dos pontos de difração no referido ensaio de parametrização, considera-se adequada a utilização dos resultados obtidos para uma incerteza padrão de medição de 0,25 píxel associada às coordenadas imagem dos pontos de difração. O Quadro 4.49 transcreve do sub-capítulo 4.4 as respetivas estimativas, incertezas padrão de medição e coeficientes de correlação considerados na posterior propagação de incertezas de medição associadas aos desvios de calibração.

Quadro 4.49: Formulação probabilística dos parâmetros intrínsecos da câmara.

Grandeza	Estimativa	Função distribuição de probabilidade	Incerteza padrão de medição	Coefficientes de correlação
Distância focal, f	599,95 mm	Normal	0,38 mm	$r(f, u_0) = -0,28$ $r(f, v_0) = -0,35$ $r(u_0, v_0) = -0,25$
Coordenada u_0 do ponto principal	545,61 píxeis	Normal	0,030 píxel	
Coordenada v_0 do ponto principal	960,41 píxeis	Normal	0,045 píxel	

4.7.2.2 Coordenadas mundo dos alvos

Nas coordenadas mundo dos alvos constituintes do sistema de medição foram identificadas as seguintes componentes de incerteza:

- (i) o ensaio dimensional dos alvos em ambiente laboratorial com recurso a MMC 3D;
- (ii) o desvio de circularidade obtido no ajuste computacional de circunferência aos oito LEDs observados em cada alvo;
- (iii) a influência térmica ambiental sobre o referencial de medição em ensaios de campo na P25A;
- (iv) a movimentação e a instalação (montagens e desmontagens) do conjunto de alvos do laboratório de medição dimensional para a fundação da torre sul na P25A;
- (v) a repetibilidade do processo de medição de coordenadas mundo dos alvos, conforme indicado na secção 4.6.2;
- (vi) a correção de refração atmosférica aplicada às coordenadas mundo verticais dos alvos.

A componente de incerteza relativa ao ensaio dimensional do referencial de medição com alvos (descrito na secção 4.6.2) combina as fontes de incerteza associadas ao equipamento de referência (MMC 3D rastreada ao SI) e ao método de medição por contacto (medição de coordenadas 3D de pontos no espaço). O Quadro 4.50 expõe a formulação probabilística adotada para cada fonte de incerteza identificada, com aplicação às duas dimensões globais nominais do referencial de medição (250 mm e 1200 mm).

No que se refere ao desvio de circularidade, esta componente de incerteza foi avaliada por via estatística convencional (incerteza de medição tipo A) com base numa amostra com dimensão igual a 50, de desvios de circularidade observados em ensaios dimensionais do referencial, nos quais se promoveu o ajuste computacional pelo MMQ de circunferência aos centros geométricos dos oito LEDs em cada alvo. Esta análise determinou um valor médio igual a 0,31 mm, com uma dispersão de valores associada a uma distribuição de probabilidade gaussiana que representa esta componente de incerteza de medição das coordenadas mundo dos alvos.

Quadro 4.50: Fontes de incerteza da componente de ensaio dimensional do referencial.

Fonte de incerteza	Função distribuição de probabilidade	Incerteza padrão de medição	L = 250 mm		L = 1200 mm	
			Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para incerteza combinada	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para incerteza combinada
Incerteza instrumental	Gaussiana	0,002 5 mm	1	0,002 5 mm	1	0,002 5 mm
Deriva instrumental	Triangular	$0,001 \text{ mm}/\sqrt{6} = 4,1 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$	1	0,000 41 mm	1	0,000 41 mm
Linearidade	Retangular	$0,000 2 \text{ mm}/\sqrt{3} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$	1	0,000 12 mm	1	0,000 12 mm
Repetibilidade	Gaussiana	0,000 2 mm	1	0,000 20 mm	1	0,000 20 mm
Instalação e montagem	Retangular	$0,000 2 \text{ mm}/\sqrt{3} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$	1	0,000 12 mm	1	0,000 12 mm
Coefficiente de expansão térmica da MMC 3D	Retangular	$2 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}/\sqrt{3} = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	-25 mm·°C	0,000 03 mm	-120 mm·°C	0,000 14 mm
Diferença média de temperatura entre MMC 3D e o referencial	Retangular	$0,4 \text{ }^{\circ}\text{C}/\sqrt{3} = 0,23 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$-1,25 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$	0,000 29 mm	$-5,6 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$	0,001 4 mm
Variação cíclica da temperatura no laboratório	Arcosseno	$1^{\circ}\text{C}/\sqrt{2} = 0,707 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$-1,25 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$	0,000 88 mm	$-5,6 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$	0,004 2 mm
Diferença entre coeficientes de expansão térmica (MMC 3D e referencial)	Retangular	$1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}/\sqrt{3} = 6,9 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	-125 mm·°C	0,000 87 mm	-600 mm·°C	0,004 2 mm
Diferença de temperatura entre MMC 3D e referencial	Retangular	$0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}/\sqrt{3} = 0,058 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$-2,88 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$	0,000 17 mm	$-1,38 \cdot 10^{-2} \text{ mm} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$	0,000 8 mm
Incerteza de medição combinada			0,002 9 mm		0,006 7 mm	

A inclusão de uma componente de incerteza relativa à expansão ou contração térmica do referencial de medição exposto ao meio envolvente do cenário de observação em estudo, justifica-se pela diferença de temperatura entre ensaios de campo na P25A e em laboratório, onde os ensaios de medição dimensional foram realizados em sala condicionada com temperatura ambiente compreendida no intervalo $(20 \pm 1) \text{ }^{\circ}\text{C}$. A quantificação desta contribuição para a incerteza combinada das coordenadas mundo dos alvos foi suportada no cálculo do valor de expansão/contração térmica máxima expectável no referencial tendo em conta:

- (i) o coeficiente de expansão térmica linear do alumínio (material predominante no referencial de medição) estimado em $23 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$;
- (ii) as dimensões globais do referencial de medição (250 mm nas direções X e Y e 1200 mm na direção Z);
- (iii) a variação térmica máxima sazonal entre o meio envolvente à P25A e o laboratório dimensional, que se considerou igual a $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (corresponde a uma

temperatura ambiente de 35 °C e 5 °C, respetivamente, nas épocas de verão e de inverno).

Com base nestes elementos, a variação linear estimada para o referencial de medição corresponde a 0,09 mm (nas direções X e Y) e 0,41 mm (na direção Z). Estes limites de variação foram utilizados na quantificação da componente de incerteza em causa (incerteza do tipo B) mediante a adoção de uma função distribuição de probabilidade retangular (centrada num valor nulo), obtendo-se uma incerteza padrão de medição igual a 0,05 mm nas direções X e Y e 0,24 mm na direção Z .

A componente de incerteza associada ao transporte e instalação do referencial de medição na P25A é justificada pelo facto da determinação das coordenadas mundo dos alvos ser efetuada previamente em laboratório mediante a realização de um ensaio dimensional. As operações de transporte e instalação até à fundação da torre sul da P25A que ocorrem posteriormente podem implicar alterações no posicionamento espacial relativo dos alvos no referencial, pelo que se considerou necessário avaliar a sua integridade dimensional com medições antes e após a realização de ensaios de campo na P25 A (*vide* Quadro 4.29 na secção 4.6.2). A formulação desta componente de incerteza foi suportada na adoção de uma função distribuição de probabilidade retangular, centrada num valor nulo e tendo como limite de variação o valor médio dos desvios absolutos obtidos para cada direção de interesse (0,72 mm em X , 0,94 mm em Y e 0,20 mm em Z), o que resultou nas seguintes estimativas de incertezas padrão de medição: 0,42 mm em X , 0,55 mm em Y e 0,12 mm em Z .

No que se refere à componente de incerteza associada à repetibilidade do processo de medição dimensional dos alvos, foram considerados os desvios padrão experimentais da amostra mencionados anteriormente no Quadro 4.28 da secção 4.6.2 (dedicada ao ensaio dimensional do referencial de medição). Deste modo, considerou-se adequada uma incerteza de medição do tipo A, associada a uma função distribuição de probabilidade gaussiana, centrada em zero e com limites de variação correspondentes aos desvios padrão experimentais das amostras (com dimensão igual a 16).

A quantificação da componente de incerteza associada à correção do efeito de refração vertical resultou de duas etapas sequenciais. Na primeira etapa, efetuou-se o estudo da incerteza de medição dos parâmetros (a , b) do modelo (não-linear) de

potência, representativo da evolução vertical do índice de refração do ar junto à superfície de topo da fundação da torre sul, dado por:

$$n(Y) = a \cdot Y^b, \quad (4.7)$$

e que pode ser expresso de forma linear através de,

$$\log[n(Y)] = \log(a) + b \cdot \log(Y). \quad (4.8)$$

A aplicação do MMQ à expressão anterior, tendo em conta o conjunto de pares de valores experimentais (Y_i , n_i), permite obter expressões analíticas para o cálculo das estimativas, variâncias e covariância dos parâmetros de interesse (*vide* Anexo 2). O Quadro 4.51 apresenta os valores obtidos para os modelos aplicados nos ensaios de calibração do sistema de medição nas épocas de verão (*vide* secção 4.6.4.2) e inverno (*vide* secção 4.6.4.3).

Quadro 4.51: Parâmetros do modelo de potência do índice de refração vertical junto à superfície de topo da fundação da torre sul da P25A

Data e hora do ensaio termohigrométrico	Parâmetro	Estimativa	Incerteza padrão	Covariância	Coefficiente de correlação
2013-06-05 15:00 (verão)	a	$1,000\,263\,614\, \text{m}^{-5,49 \cdot 10^{-7}}$	$8,1 \cdot 10^{-8} \text{m}^{-5,49 \cdot 10^{-7}}$	$3,6 \cdot 10^{-15} \text{m}^{-5,49 \cdot 10^{-7}}$	0,81
	b	$5,49 \cdot 10^{-7}$	$5,5 \cdot 10^{-8}$		
2014-03-26 15:50 (inverno)	a	$1,000\,278\,223\, \text{m}^{-5,38 \cdot 10^{-8}}$	$5 \cdot 10^{-9} \text{m}^{-5,38 \cdot 10^{-8}}$	$1,2 \cdot 10^{-17} \text{m}^{-5,38 \cdot 10^{-8}}$	0,81
	b	$5,38 \cdot 10^{-8}$	$3,1 \cdot 10^{-9}$		

Os valores obtidos foram aplicados na segunda etapa do processo de quantificação da componente de incerteza associada à correção de refração vertical, tendo em consideração a contribuição adicional devido à incerteza associada à posição nominal (Y , Z) dos alvos e à posição associada a $\frac{1}{2}$ do trajeto óptico entre a câmara e os alvos, conforme previsto na abordagem geodésica e ilustrado nas Figuras 4.87 e 4.88.

No caso das posições nominais da câmara e dos alvos, a sua formulação probabilística foi suportada na adoção de uma função distribuição de probabilidade gaussiana centrada em zero e com limites de variação iguais a ± 10 mm (correspondentes a uma majoração da incerteza requerida para a medição do deslocamento da P25A).

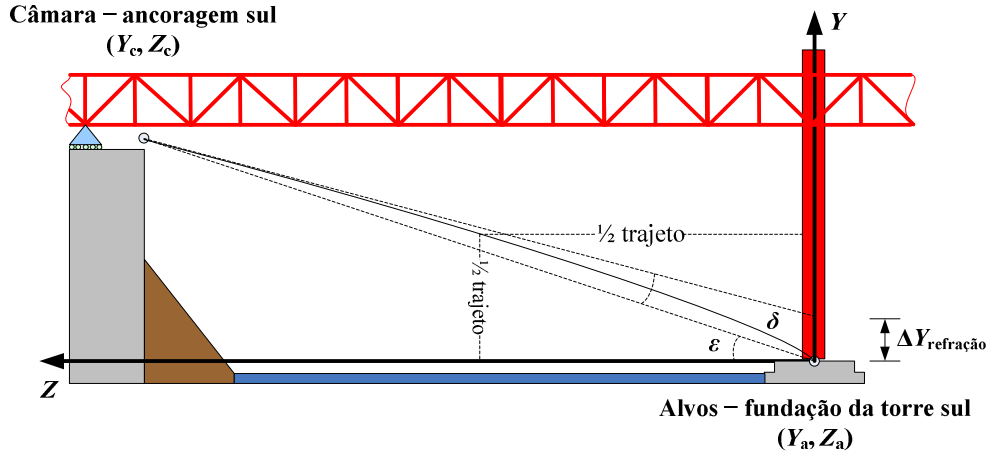


Figura 4.87: Refração vertical no ensaio de calibração do sistema de medição.

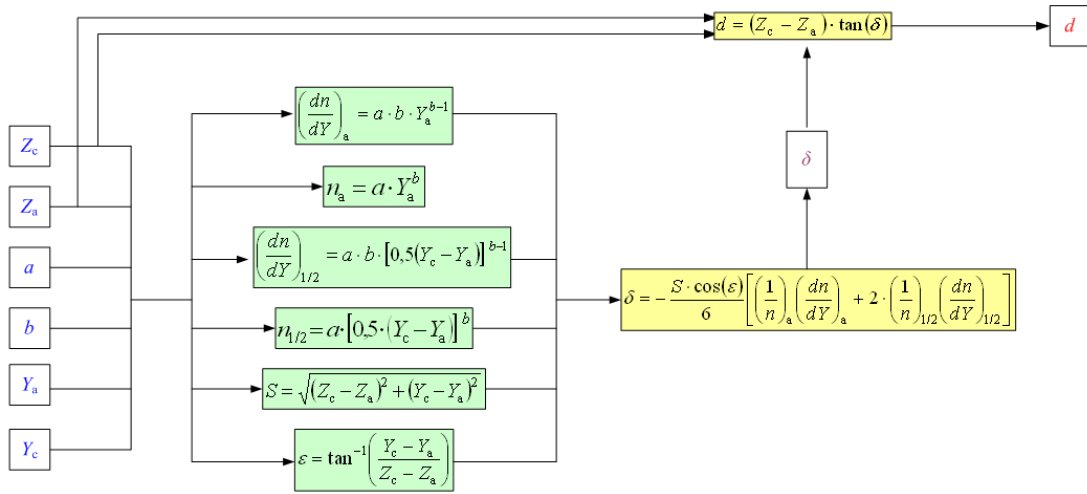


Figura 4.88: Diagrama funcional de propagação de incerteza de medição associada à correção do efeito de refração vertical

Como se pode observar na Figura 4.88, as expressões utilizadas no cálculo da correção do efeito de refração vertical constituem modelos não-lineares, pelo que se recorreu ao MMC para concretização do processo de propagação das distribuições associadas às incertezas de medição de modo a se obter a distribuição representativa da grandeza de saída (correção do efeito de refração). Neste âmbito, o processo de simulação de Monte Carlo desenvolvido recorreu a um gerador de números pseudoaleatórios de Mersenne Twister [Matsumoto (1998)] para a obtenção de sequências com dimensão típica de 10^6 , utilizando algoritmos de conversão e ordenação validados, bem como um algoritmo de cálculo para determinação do intervalo da incerteza expandida (95%) [S1-GUM (2008)].

Os resultados obtidos são expostos no Quadro 4.52 para os dois cenários estudados, enquanto que a Figura 4.89 apresenta dois exemplos de distribuições de probabilidade normalizadas referentes à correção do efeito de refração vertical em duas situações de observação distintas.

Quadro 4.52: Resultados das simulações de Monte Carlo – correção do efeito de refração vertical.

Cenário de observação	2013-06-05 / 15:00 (verão)			2014-03-26 / 15:50 (inverno)		
	Estimativa	Incerteza expandida (95%)	Incerteza computacional (95%)	Estimativa	Incerteza expandida (95%)	Incerteza computacional (95%)
Altura do alvo (m)						
0,32	11,2 mm	0,70 mm	0,011 mm	1,07 mm	0,049 mm	<0,001 mm
0,57	6,4 mm	0,35 mm	0,005 mm	0,61 mm	0,022 mm	<0,001 mm
0,82	4,5 mm	0,23 mm	0,003 mm	0,43 mm	0,014 mm	<0,001 mm

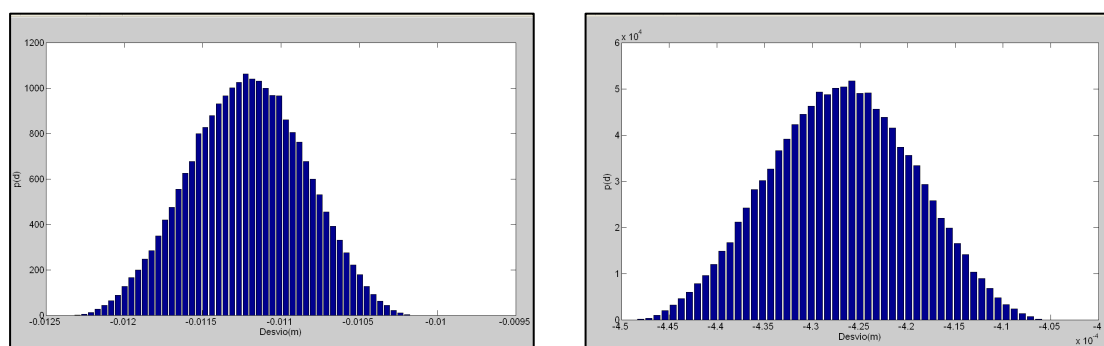


Figura 4.89: Distribuições normalizadas da correção do efeito de refração vertical nos cenários de observação: altura do alvo 0,32 m no verão (à esq.) e altura do alvo 0,82 m no inverno (à dir.).

As sequências numéricas obtidas para a grandeza de saída – correção do efeito de refração vertical – evidenciam distribuições de probabilidade gaussianas. As incertezas expandidas de medição variam entre 0,23 mm e 0,70 mm, no caso de observação no verão; e entre 0,014 mm e 0,049 mm, para o cenário de inverno. As respectivas incertezas expandidas de origem computacional (associadas ao procedimento numérico de simulação de Monte Carlo) apresentam valores inferiores em relação à dispersão de valores associada à grandeza de interesse.

Concluída a quantificação de cada uma das componentes de incerteza identificadas para as coordenadas mundo dos alvos, pode-se avançar para o cálculo das respectivas incertezas padrão de medição combinadas, aplicando a LPI [GUM (1993)]. O Quadro 4.53 resume as contribuições para as incertezas padrão de medição das componentes consideradas no caso em estudo (de cenário de observação desfavorável na época de verão e com aplicação de correção do efeito de refração vertical).

Quadro 4.53: Componentes de incerteza das coordenadas mundo dos alvos.

Componente de incerteza	Função distribuição de probabilidade	Incerteza padrão de medição		
		Direção X	Direção Y	Direção Z
Ensaio dimensional	Gaussiana	0,002 9 mm	0,002 9 mm	0,006 7 mm
Circularidade dos alvos	Gaussiana	0,31 mm	0,31 mm	0,31 mm
Variação térmica	Retangular	0,03 mm	0,03 mm	0,14 mm
Transporte e instalação	Retangular	0,54 mm	0,12 mm	0,42 mm
Repetibilidade	Gaussiana	0,35 mm	0,19 mm	0,08
Correção do efeito de refração	Gaussiana	Não aplicável	0,35 mm	Não aplicável
Incertezas padrão de medição combinadas		0,65 mm	0,60 mm	0,54 mm

Da análise dos resultados verifica-se que os valores das incertezas padrão de medição não se distinguem, de forma significativa, para as diferentes direções, variando entre 0,54 mm e 0,65 mm. A análise de sensibilidade realizada (*vide* resultados na Figura 4.90) revela que, nas direções X e Z, a principal contribuição para a incerteza de medição encontra-se no transporte e instalação do referencial (contribuições de 50% e 43%, respetivamente), seguida da circularidade do alvo, com uma contribuição da ordem de 30%. Salienta-se o facto de, na direção Z, a contribuição da variação da temperatura ambiente ser superior à da repetibilidade, o que não se verifica para a direção X, justificada pela diferença dimensional do referencial nas duas direções referidas (1200 mm em Z e 250 mm em X).

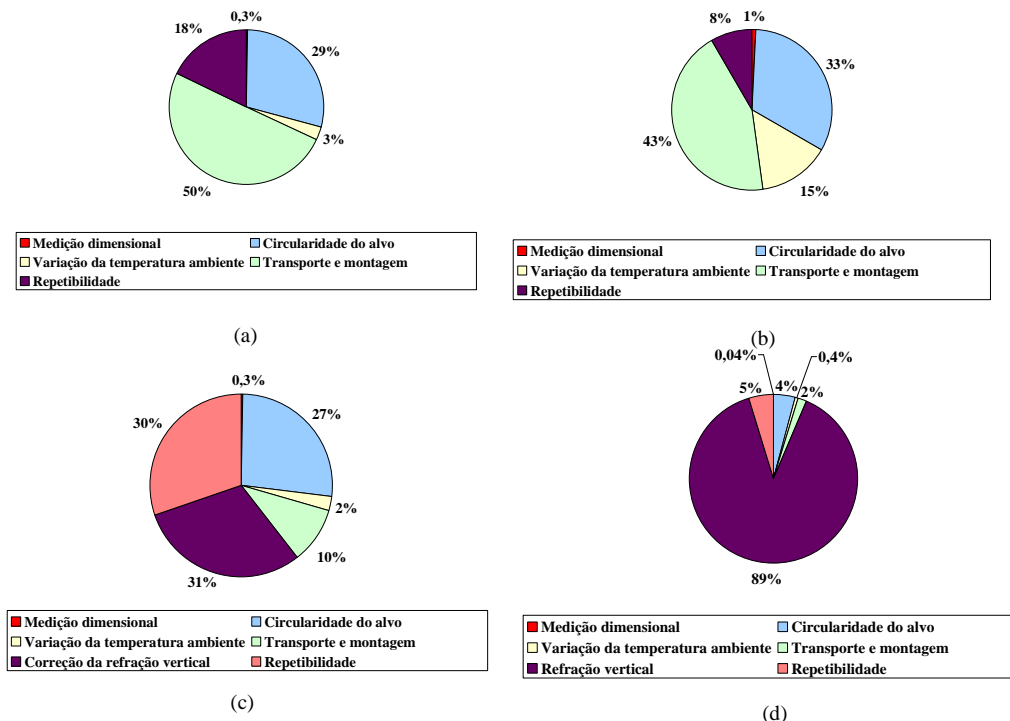


Figura 4.90: Análise de sensibilidade das componentes de incerteza das coordenadas mundo dos alvos: (a) direção X; (b) direção Z; (c) direção Y com correção de refração; (d) direção Y sem correção de refração.

No caso particular da direção vertical (Y), a componente de incerteza associada à correção do efeito de refração vertical constitui a principal contribuição para a incerteza padrão combinada da coordenada mundo dos alvos, em conjunto com a repetibilidade e a circularidade do alvo.

Na ausência de correção deste efeito sistemático e considerando a época de observação estudada (verão), onde o fenómeno da refração atmosférica é mais acentuado, é expectável uma subida acentuada da magnitude da incerteza de medição combinada na direção vertical. Por exemplo, no caso dos alvos posicionados a uma altura de 0,32 m relativamente à superfície da fundação e tendo em conta a magnitude do respetivo desvio vertical (11,2 mm) na situação analisada anteriormente, a quantificação de uma componente de incerteza associada à refração vertical – assumindo uma função distribuição de probabilidade retangular centrada em zero e com limites de variação iguais ao valor do desvio sistemático – corresponde a 6,5 mm, dominando a incerteza de medição combinada da coordenada mundo Y com um peso de, aproximadamente, 89% (*vide* Figura 4.90.d). Este exemplo ilustra a pertinência da aplicação de correção do efeito de refração vertical em cenário de observação, sobretudo, em época de verão onde o gradiente térmico vertical que se observa junto à superfície da fundação é mais acentuado.

4.7.2.3 Coordenadas imagem dos alvos

Na análise do processo de medição das coordenadas imagem dos alvos foram identificadas duas componentes de incerteza principais: o processamento digital de imagem (associado ao ajuste de elipse à imagem dos alvos, tendo em vista a determinação do seu centro geométrico) e o efeito de feixe errante decorrente do fenómeno de turbulência atmosférica associada ao gradiente térmico vertical no trajeto óptico da luz percorrido entre o alvo e a câmara.

Conforme descrito na secção 4.6.2 (dedicada ao estudo da turbulência atmosférica), a realização de ensaios de feixe errante na P25A, por ocasião da realização dos ensaios de calibração do sistema de medição, permitiu quantificar o efeito combinado destas duas componentes de incerteza. Nesses ensaios, a condição estática da câmara (na ausência de solicitações operacionais significativas como, por exemplo, passagem de comboio no tabuleiro inferior) e dos alvos no dispositivo de

transferência permite atribuir qualquer movimento registrado dos alvos na sequência de imagens obtidas às referidas componentes de incerteza.

Neste caso, recorre-se aos desvios padrão experimentais das amostras obtidos para a quantificação da incerteza de medição combinada das coordenadas imagem dos alvos. Face aos valores máximos e mínimos de dispersão observados nos ensaios de feixe errante (*vide* Figuras 4.70 e 4.71) consideram-se, na avaliação de incertezas de medição realizada, dois cenários de observação distintos: (i) em época de verão sem sombra, onde se registou um desvio padrão máximo de 0,56 píxel; (ii) no inverno com sombra sobre os alvos, onde o valor mínimo de dispersão correspondeu a 0,13 píxel. A formulação probabilística das coordenadas imagem dos alvos permite que se adote uma função distribuição de probabilidade gaussiana, centrada em zero e com limites de variação iguais aos valores de desvio padrão referidos (incerteza do tipo A).

4.7.2.4 Deslocamento de referência

No que se refere às estimativas do deslocamento de referência nos ensaios de calibração do sistema de medição, foram identificadas e quantificadas as seguintes componentes de incerteza:

- (i) a medição dimensional das posições inicial e final do referencial de medição, onde se incluem as fontes de incerteza associadas ao ensaio dimensional com recurso a MMC 3D e o desvio de circularidade originado pelo ajuste computacional de circunferência ao conjunto de LEDs do alvo;
- (ii) o desvio de retorno a zero, cuja quantificação foi avaliada pela observação dos valores máximos no ensaio dimensional do padrão de referência, quando o conjunto de alvos retorna à posição inicial após deslocamento;
- (iii) a repetibilidade associada à instalação manual do referencial com os alvos nas posições de referência do dispositivo de transferência, mediante a realização de ensaios de repetibilidade, conforme descrito na secção 4.6.3.

O Quadro 4.54 expõe a formulação probabilística dos deslocamentos de referência nas três direções estudadas (transversal, vertical e longitudinal).

Quadro 4.54: Componentes de incerteza dos deslocamentos de referência

Fonte de incerteza	Função distribuição de probabilidade	Incerteza padrão de medição		
		Direção X	Direção Y	Direção Z
Medição da posição inicial	Gaussiana	0,31 mm	0,31 mm	0,31 mm
Medição da posição final	Gaussiana	0,31 mm	0,31 mm	0,31 mm
Desvio de retorno a zero	Gaussiana	0,07 mm (T)	0,02 mm (T)	0,04 mm (T)
		0,02 mm (V)	0,00 mm (V)	0,21 mm (V)
		0,04 mm (L)	0,01 mm (L)	0,11 mm (L)
Repetibilidade da montagem experimental	Gaussiana	0,65 mm (T)	0,54 mm (T)	0,17 mm (T)
		0,65 mm (V)	0,27 mm (V)	0,21 mm (V)
		0,34 mm (L)	0,21 mm (L)	0,07 mm (L)
Incerteza padrão de medição combinada		0,79 mm (T)	0,70 mm (T)	0,47 mm (T)
		0,78 mm (V)	0,51 mm (V)	0,53 mm (V)
		0,56 mm (L)	0,49 mm (L)	0,46 mm (L)

Legenda: T – transversal; V – vertical; L – longitudinal.

4.7.3 Estágio intermédio

A propagação das incertezas de medição determinadas para as grandezas de entrada, que suportam a medição posicional do centro de projeção da câmara no mundo, foi efetuada com recurso ao MMC tendo em conta o processo de otimização não-linear multivariável utilizado para esse efeito, utilizando o mesmo tipo de abordagem iterativa mencionada anteriormente no contexto da parametrização intrínseca da câmara (*vide* Figura 4.29 no sub-capítulo 4.4), onde o resultado de uma simulação de Monte Carlo atualiza os valores iniciais da otimização não-linear subsequente assegurando, deste modo, a convergência das sequências numéricas de saída. Neste âmbito, foram utilizados os mesmos algoritmos validados de geração de números pseudoaleatórios de Mersenne-Twister [Matsumoto (1998)], conversão, ordenação e avaliação de exatidão computacional [S1-GUM (2008)] na geração das sequências de saída com dimensão típica de 10^4 .

A Figura 4.91 resume os valores das incertezas expandidas de medição, obtidas para um intervalo de confiança de 95% nos ensaios de calibração em épocas de verão e inverno. Salienta-se que o nível de exatidão computacional (num intervalo de confiança de 95%) destas incertezas correspondeu a 0,1 mm para as posições transversal (X_0) e vertical (Y_0) e a 1 mm para a posição longitudinal (Z_0), o que se considera aceitável face à magnitude das incertezas expandidas de medição que foram obtidas. A Figura 4.92 mostra as correspondentes funções de distribuição de probabilidade geradas usando o MMC, as quais apresentam uma forma geométrica identificada como gaussiana.

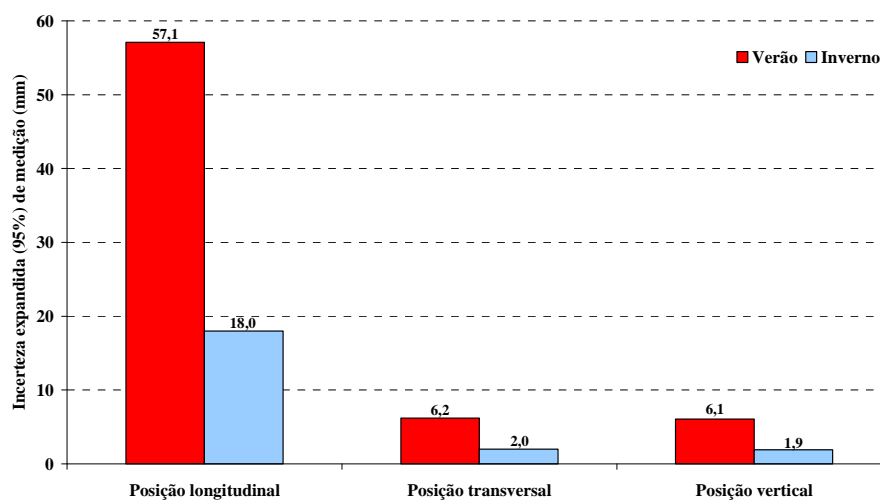


Figura 4.91: Incertezas expandidas (95%) de medição posicional da câmara em épocas distintas.

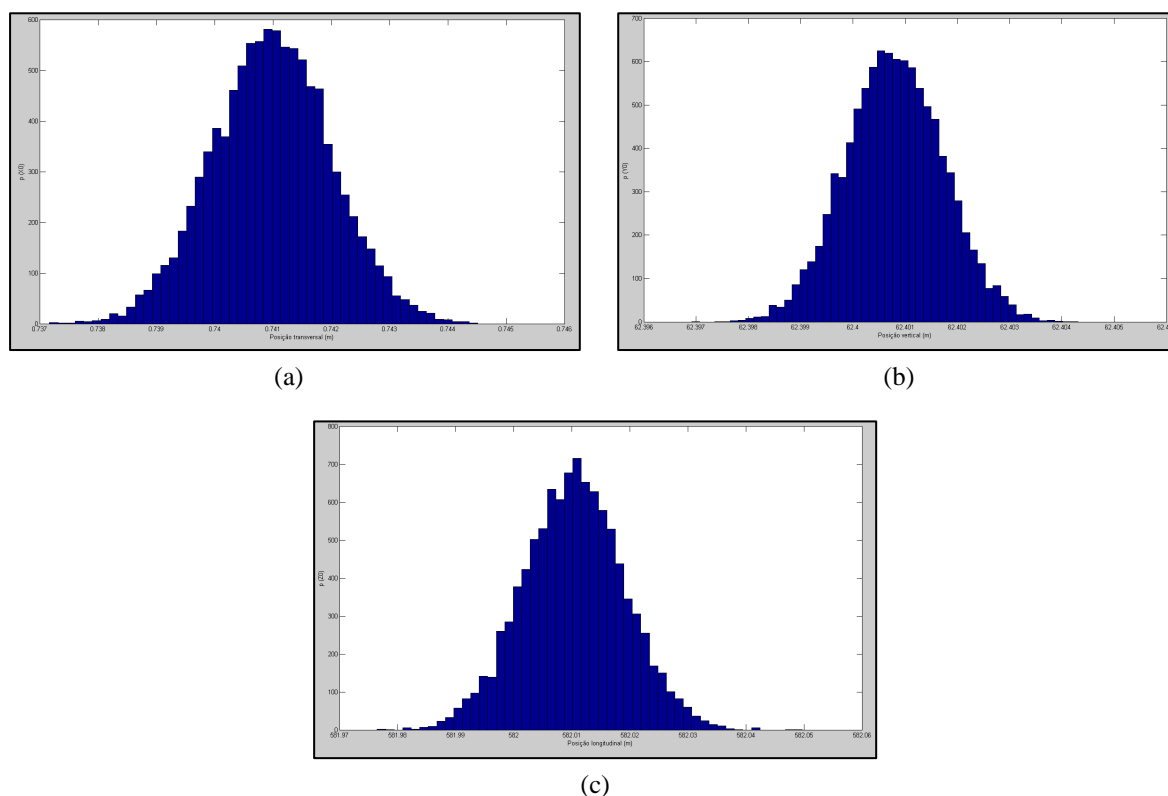


Figura 4.92: Funções de distribuição de probabilidade da posição do centro de projeção da câmara:
(a) transversal; (b) vertical; (c) longitudinal.

A Figura 4.91 mostra que as incertezas expandidas de medição das posições transversal e vertical são idênticas entre si em ambas as épocas de calibração estudadas: incerteza próxima de 6 mm no verão e 2 mm no inverno.

Já no caso da posição longitudinal, a magnitude da sua incerteza expandida de medição é muito superior em relação às restantes posições, sobretudo, na época de

verão, onde atinge um valor de 57,1 mm. Este facto evidencia que o sistema óptico desenvolvido para a P25A tem limitações para a medição de deslocamento longitudinal do $\frac{1}{2}$ vão principal, para o qual se exige um nível de exatidão igual ou menor a 10 mm, situação que não ocorreu nas duas épocas de observação analisadas (incluindo no inverno onde se obteve uma incerteza expandida de 18 mm).

No caso da P25A, este condicionalismo é minimizado pela existência de instrumentação alternativa – cadeias de medição por contacto com transdutores de deslocamento – em ambas as regiões de transição da viga de rigidez para as ancoragens sul e norte, para as quais se obtém um nível de exatidão dimensional considerado satisfatório.

Em todas as posições estudadas é notória a significativa redução da incerteza de medição da época de verão para o inverno, o que indicia a existência de contribuições dominantes das incertezas de medição de coordenadas imagem e mundo dos alvos, conforme se confirma pela análise de sensibilidade realizada (*vide* resultados na Figura 4.93).

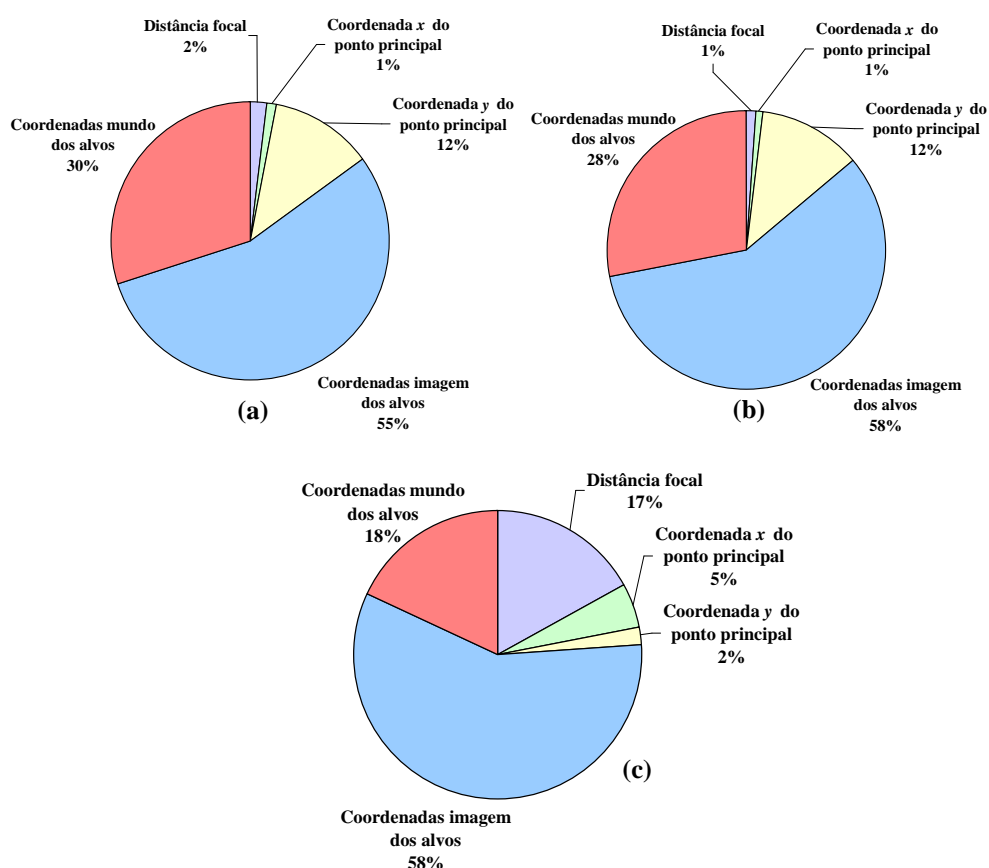


Figura 4.93: Contribuições para a incerteza de medição das coordenadas mundo do centro de projeção da câmara: (a) X_0 ; (b) Y_0 ; (c) Z_0 .

Verifica-se que as coordenadas imagem dos alvos constituem a contribuição dominante para as incertezas de medição da posição da câmara (superior a 50%), evidenciando o significativo impacto do fenómeno da turbulência atmosférica por motivo de gradiente térmico vertical acentuado, do processamento digital e da qualidade das imagens dos alvos. Em segundo lugar, surge a contribuição das coordenadas mundo dos alvos (próxima de 30% nas posições transversal e vertical e menor no caso da posição longitudinal). Quanto aos parâmetros intrínsecos da câmara, a sua contribuição para a incerteza é quase residual com exceção da distância focal, no caso da posição longitudinal (17%) e da coordenada y do ponto principal para os casos das posições transversal e vertical (12%).

4.7.4 Estágio final

Conhecidas as incertezas de medição associadas às grandezas intermédias – posições final e inicial do centro de projeção da câmara – e aos deslocamentos de referência aplicados no ensaio de calibração (*vide* secção 4.7.2), pode-se proceder ao cálculo das incertezas de medição associadas aos desvios de calibração mencionados nas secções 4.6.4.2 e 4.6.4.3.

Considerando o modelo linear que determina o desvio de calibração, δ_{calib} , numa dada direção (diferença entre posições final, l_{final} , inicial, l_{inicial} , e deslocamento de referência, Δl_{ref}), promoveu-se a aplicação da LPI seguindo as orientações definidas no [GUM (1993)], de onde resulta a expressão da variância associada à grandeza de saída

$$u^2(\delta_{\text{calib}}) = u^2(l_{\text{final}}) + u^2(l_{\text{inicial}}) + u^2(\Delta l_{\text{ref}}) - 2 \cdot u(l_{\text{final}}) \cdot u(l_{\text{inicial}}) \cdot r(l_{\text{final}}, l_{\text{inicial}}), \quad (4.9)$$

onde se incluiu o efeito de correlação entre as posições inicial e final da câmara, atendendo ao facto de serem determinadas com base no mesmo método e sistema de medição óptica, o que não se verifica no caso da grandeza deslocamento de referência, cuja quantificação se faz em laboratório.

O cálculo dos coeficientes de correlação, suportado em amostras com 12 pares de posições iniciais e finais da câmara revelaram a existência de correlação nula para as direções Y e Z e reduzida (coeficiente de correlação de 0,1) na direção X. Face a

estes resultados, considera-se adequado majorar a variância do desvio de calibração por:

$$u^2(\delta_{\text{calib}}) = u^2(l_{\text{final}}) + u^2(l_{\text{inicial}}) + u^2(\Delta l_{\text{ref}}). \quad (4.10)$$

Os Quadros 4.55 e 4.56 apresentam as incertezas expandidas (95%) de medição dos desvios de calibração para as épocas de verão e de inverno, respetivamente, para as direções de deslocamento analisadas.

Quadro 4.55: Incertezas expandidas (95%) de medição dos desvios de calibração em época de verão.

Direção	Deslocamento transversal	Deslocamento vertical	Deslocamento longitudinal
X	8,8 mm	8,7 mm	8,8 mm
Y	8,8 mm	8,8 mm	8,8 mm
Z	81 mm	81 mm	81 mm

Quadro 4.56: Incertezas expandidas (95%) de medição dos desvios de calibração em época de inverno.

Direção	Deslocamento transversal	Deslocamento vertical	Deslocamento longitudinal
X	3,2 mm	3,0 mm	3,2 mm
Y	3,0 mm	2,9 mm	3,0 mm
Z	25 mm	25 mm	25 mm

À semelhança do que se verificou no estágio intermédio de propagação de incerteza, é notória a elevada magnitude da dispersão de valores associados à direção Z em todos os deslocamentos considerados em ambas as épocas estudadas (81 mm no verão e 25 mm no inverno). Os valores obtidos são consideravelmente superiores ao nível de exatidão requerido (10 mm) para a análise dinâmica do ½ vão principal da P25A, o que não se verifica nas restantes direções X e Y: aproximadamente, 9 mm e 3 mm de incerteza expandida (95%) de medição dos desvios de calibração obtidos (respetivamente, no verão e no inverno). Deste modo, o sistema de medição óptica desenvolvido apresenta um nível de exatidão considerado satisfatório para a medição de deslocamentos transversais e verticais em condições ambientais próximas das verificadas nas duas épocas de realização de ensaios de calibração.

A análise de sensibilidade das grandezas intervenientes no cálculo do desvio de calibração, numa dada direção de interesse, revela que:

- (i) na direção longitudinal, a contribuição da incerteza de medição do deslocamento de referência para a incerteza combinada pode-se considerar

- residual, sendo as contribuições das incertezas das posições inicial e final dominantes e com ponderação idêntica (50%), quer no verão, quer no inverno;
- (ii) na direção transversal, as contribuições das incertezas das posições inicial e final continuam a ser dominantes e próximas no verão, contudo, ligeiramente inferiores (49%) ao obtido na direção longitudinal; na época de inverno, a contribuição da incerteza de medição do deslocamento de referência sobe para valores entre 10% e 20%, mantendo-se as contribuições dominantes das incertezas das posições inicial e final (entre 40% e 45%) ;
 - (iii) na direção vertical, a contribuição da incerteza de medição associada ao deslocamento de referência ocupa uma posição não-dominante em relação às restantes contribuições, notando-se uma aproximação no caso dos ensaios de calibração realizados no inverno, evoluindo de uma ponderação compreendida entre 2% e 3% (no verão) para uma contribuição situada 15% e 25% (no inverno).

Resumindo, os resultados obtidos mostram que uma melhoria da incerteza de medição nos ensaios de calibração pode ser obtida pela melhoria da incerteza de medição associada à posição da câmara (inicial e final) estando esta associada à incerteza de medição das coordenadas imagem dos alvos. Neste sentido, os esforços de melhoria devem ser orientados para o processamento digital e para a qualidade da imagem dos alvos (atuando, por exemplo, na abertura da câmara e no tempo de exposição do sensor de imagem tendo em vista a melhoria da resolução espacial), bem como, na realização do ensaio em condições mais favoráveis, nomeadamente, em época de inverno e na ausência de gradiente térmico vertical significativo na fundação da torre sul da P25A, sabendo-se que essa circunstância minimiza o efeito de feixe errante devido ao fenómeno da turbulência atmosférica.

4.8 Medição de deslocamento em regime dinâmico

4.8.1 Descrição das campanhas de medição em campo

Neste sub-capítulo é promovida a descrição da concretização da abordagem óptica aplicada ao cenário de observação da P25A, visando a medição do deslocamento dinâmico do $\frac{1}{2}$ vão principal, sendo esta uma região estrutural de interesse privilegiado para a caracterização do seu comportamento. Nos resultados apresentados é efetuada uma distinção entre duas situações operacionais – na ausência de tráfego ferroviário no tabuleiro inferior (secção 4.8.2) e na presença deste (secção 4.8.3) – em acréscimo à solicitação dinâmica permanente do vento e do tráfego rodoviário sobre a viga de rigidez. O Quadro 4.57 resume os ensaios de medição realizados durante as duas campanhas de medição (no verão e no inverno) em campo, os quais constituíram observações pontuais do comportamento dinâmico do $\frac{1}{2}$ vão principal da P25A.

Quadro 4.57: Campanhas de medição de deslocamento do $\frac{1}{2}$ vão principal da P25A.

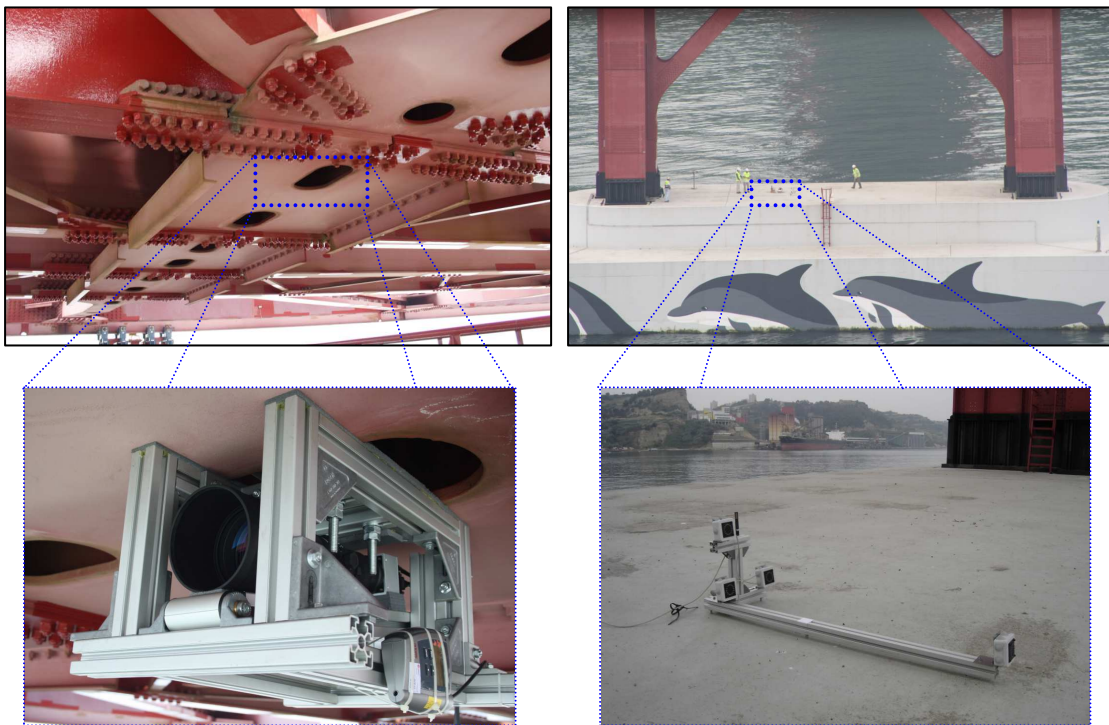
Estação do ano	Identificação do ensaio	Data	Duração	Condições de tráfego ferroviário	Outras solicitações
Verão	1	2013-07-18	11:36 – 11:39	Comboio de passageiros	Tráfego rodoviário e vento
	2		11:55 – 11:58	Sentido norte → sul	
	3		12:21 – 12:24	Comboio de passageiros Sentido sul → norte	
Inverno	4	2014-03-26	11:25 – 11:28	Comboio de passageiros Sentido sul → norte	
	5		11:43 – 11:46	Inexistente	
	6		12:00 – 12:03	Comboio de passageiros Sentido norte → sul	

De acordo com o método de medição proposto, a câmara foi instalada no $\frac{1}{2}$ vão principal na zona central da superfície inferior da viga de rigidez enquanto que o referencial de medição com alvos ativos foi posicionado na fundação da torre sul e orientado segundo as direcções principais de deslocamento da P25A, conforme ilustrado nas Figuras 4.94 e 4.95.

Salienta-se que a câmara foi montada numa estrutura de alojamento dedicada para fixação pontual⁴ à viga de rigidez. No desenvolvimento desta estrutura de alojamento foram estabelecidos como principais requisitos funcionais:

⁴ Os ensaios de medição realizados tiveram uma duração individual aproximada de $\frac{1}{2}$ dia, não tendo sido promovida a sua fixação permanente na P25A, pelo que a solução de alojamento desenvolvida não

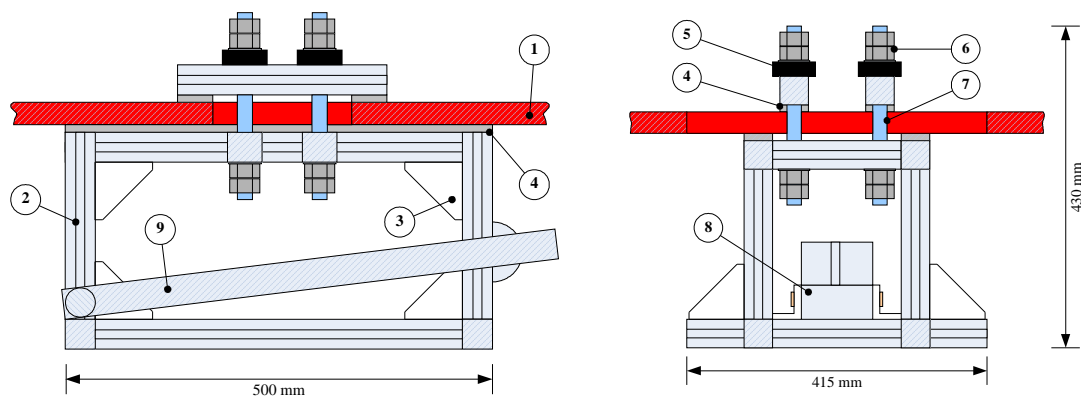
- (i) a capacidade de efetuar uma ligação rígida amovível entre a câmara e a viga de rigidez;
- (ii) a compatibilidade dimensional com a abertura existente na região inferior do $\frac{1}{2}$ vão principal da viga de rigidez e com os elementos estruturais envolventes;
- (iii) a mitigação de vibrações de elevada frequência na interface entre a estrutura de alojamento e a viga de rigidez;
- (iv) a orientação variável da câmara em relação à fundação da torre;
- (v) a capacidade de transporte manual da ancoragem sul até à plataforma móvel posicionada na região inferior do $\frac{1}{2}$ vão principal.



*Figuras 4.94 e 4.95: Locais de instalação do sistema de medição na P25A:
 $\frac{1}{2}$ vão principal (à esq.) e fundação da torre sul (à dir.).*

A estrutura de alojamento desenvolvida está representada esquematicamente na Figura 4.96, onde se mencionam os seus principais elementos constituintes.

contempla os correspondentes requisitos associados à medição contínua de deslocamento (conforme mencionado na secção 3.2.5).



Legenda: 1 – viga de rigidez; 2 – perfil de alumínio (45×45) mm²; 3 – esquadro; 4 – poliestireno expandido; 5 – anel de borracha; 6 – porcas M20; 7 – varão roscado M20; 8 – rótula; 9 – perfil para montagem da câmara.

Figura 4.96: Representação esquemática da ligação da estrutura de alojamento à viga de rigidez.

Neste conjunto, destaca-se a inclusão de anéis de borracha e camadas de poliestireno expandido na ligação à viga de rigidez visando o isolamento de vibrações de elevada frequência, embora se tenha constatado uma elevada rigidez estrutural na região central inferior do $\frac{1}{2}$ vão principal (*vide* Figura 4.94), onde predominam vibrações de baixa frequência⁵, as quais se pretendeu registar com a solução proposta.

A Figura 4.97 ilustra as principais etapas do processo de montagem da câmara no $\frac{1}{2}$ vão principal: (i) instalação da estrutura de alojamento; (ii) montagem da câmara na estrutura de alojamento; (iii) orientação da câmara relativamente à fundação da torre sul; (iv) definição de parâmetros operacionais na aplicação computacional de aquisição de imagem.

Para cada um dos ensaios de medição de deslocamento mencionados no Quadro 4.57, foi estabelecida a aquisição de sequências temporais de imagens – formato digital BMP e resolução radiométrica igual a oito bits – com uma frequência de aquisição de 15 Hz durante um intervalo de tempo de observação igual a três minutos. Deste modo, procurou-se estabelecer um equilíbrio entre a capacidade máxima de aquisição de imagem (15 Hz em modo singular) da câmara com interesse para a análise dinâmica do comportamento do $\frac{1}{2}$ vão principal da P25A e a dimensão computacional das sequências de imagens obtidas (compostas por 2700 imagens com

⁵ De acordo com [Rodrigues (2011-b)], o $\frac{1}{2}$ vão principal da P25A apresenta as seguintes frequências naturais de vibração: a nível transversal – 0,068 Hz, 0,131 Hz, 0,169 Hz e 0,205 Hz; a nível vertical – 0,116 Hz, 0,145 Hz e 0,227 Hz. Os respetivos níveis de aceleração estão compreendidos entre 0,01 m·s⁻² e 0,05 m·s⁻² na direção transversal e 0,02 m·s⁻² e 0,08 m·s⁻² na direção vertical.

2,1 Mbytes correspondendo a uma dimensão computacional total igual a 5,67 Gbytes por sequência).

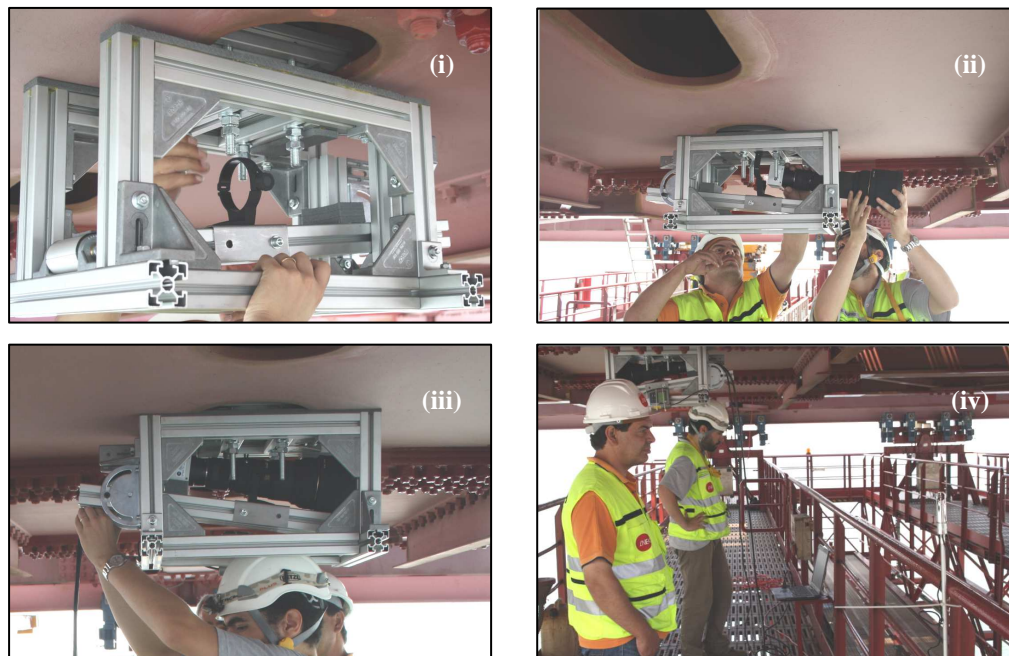
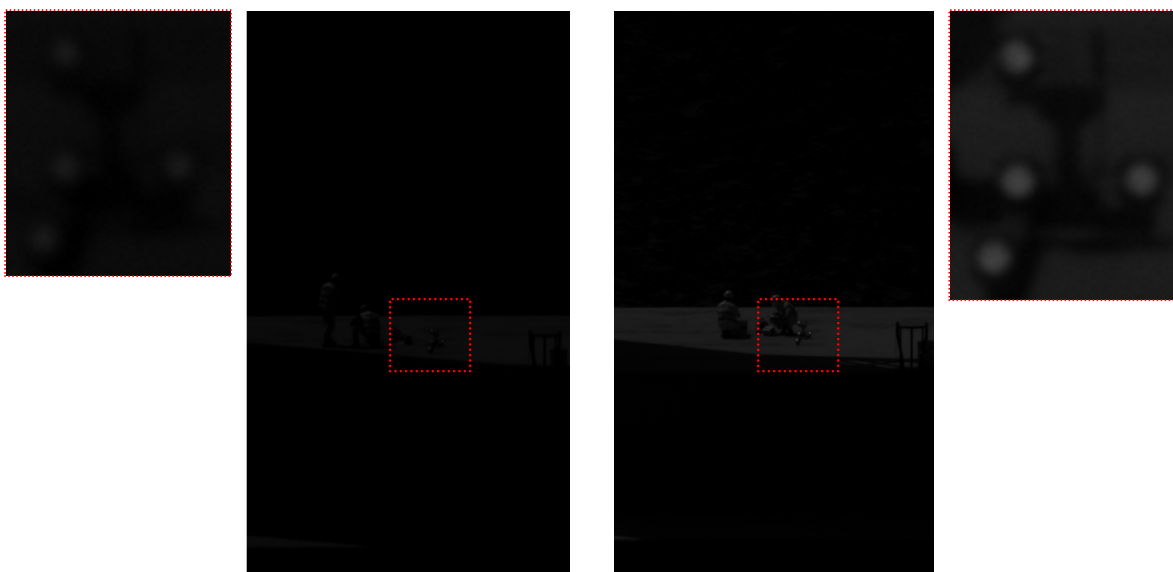


Figura 4.97: Montagem da câmara no 1/2 vão principal da P25A.

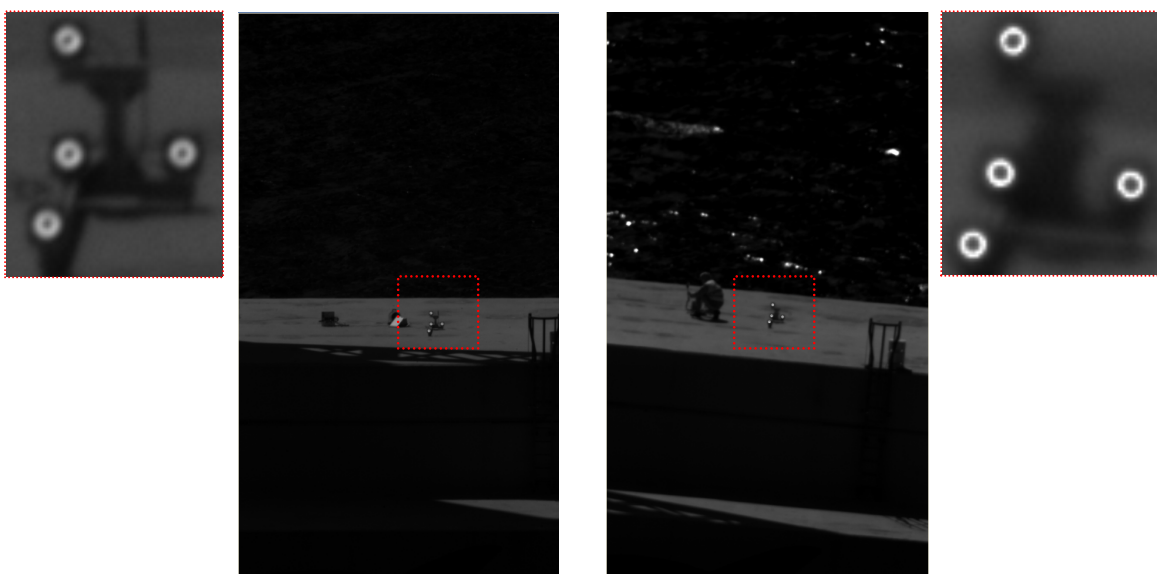
Tendo em conta os resultados obtidos nos ensaios de parametrização intrínseca da câmara (*vide* sub-capítulo 4.4), foi adoptada a posição A de focagem no infinito visto estar associada a uma repetibilidade mais elevada comparativamente com as restantes posições de focagem estudadas. No que respeita à abertura da câmara e tempo de exposição do sensor de imagem, foram adoptados os valores mencionados no Quadro 4.58 apresentando-se, nas Figuras 4.98 a 4.101, exemplos das imagens obtidas.

Quadro 4.58: Valores de abertura da câmara e tempo de exposição nos ensaios de medição de deslocamento na P25A.

Estação do ano	Identificação do ensaio	Tempo de exposição (ms)	Abertura da câmara (f/#)
Verão	1	20 ms	f/32
	2		f/22
	3		f/16
Inverno	4	2,5 ms	f/5,6
	5		
	6		



Figuras 4.98 e 4.99: Imagens do referencial obtidas nos ensaios de medição de deslocamento do 1/2 vão principal da P25A: com abertura $f/32$ (à esq.) e abertura $f/22$ (à dir.).



Figuras 4.100 e 4.101: Imagens do referencial obtidas nos ensaios de medição de deslocamento do 1/2 vão principal da P25A: com abertura $f/16$ (à esq.) e abertura $f/5,6$ (à dir.).

No Quadro 4.58 é possível constatar uma significativa diferença entre as campanhas de verão e de inverno no que respeita à abertura da câmara e ao tempo de exposição. Nestas verifica-se que nos primeiros ensaios realizados (ensaios 1 a 3) foram utilizadas aberturas da câmara reduzidas e tempo de exposição prolongado, justificado pela preocupação com a qualidade de imagem relativamente a reflexões provenientes do meio envolvente aos alvos (designadamente, da superfície da

fundação e do rio) e a saturação do sensor. Contudo, esta opção refletiu-se na perda de resolução espacial da imagem dos alvos afetando os desvios de calibração obtidos (*vide* secções 4.6.4.2 e 4.6.4.3), sendo uma das manifestações a observação de um efeito de arrastamento (*blurring*) associado ao deslocamento vertical da câmara no intervalo de tempo de passagem de tráfego ferroviário no ½ vão principal, conforme ilustrado na Figura 4.102.

Este período é caracterizado por uma alteração significativa da velocidade e da aceleração verticais da viga de rigidez naquela região dinâmica, afetando a qualidade das imagens dos alvos e impedindo a determinação das respetivas coordenadas imagem com um nível de exatidão considerado aceitável. Como se verá adiante, na secção 4.8.3, a diminuição do tempo de exposição (de 20 ms para 2,5 ms) e o aumento da abertura da câmara (de $f/16$ para $f/5,6$) permitiram obter uma mitigação satisfatória deste efeito de arrastamento, tornando possível obter uma discriminação do número de carruagens associadas ao tráfego ferroviário.



Figura 4.102: Efeito de arrastamento observado durante a passagem de comboio na primeira campanha de medição na P25A (abertura $f/16$ e tempo de exposição de 20 ms).

Menciona-se, igualmente, o estabelecimento de uma intensidade de corrente direta nominal em cada alvo ativo igual a 75 mA (nos ensaios de medição efetuados observou-se uma estabilidade da intensidade de corrente elétrica próxima de 0,1 mA) e o registo das condições ambientais observadas durante os ensaios de medição de deslocamento. Esta última tarefa foi concretizada mediante a medição automática da temperatura e da humidade relativa do ar e da medição não-automática da velocidade do vento usando, respetivamente, termohigrómetros digitais e anemómetros de turbina (mencionados anteriormente no estudo da refração atmosférica, *vide* sub-capítulo 4.5.1), com leituras em intervalos de tempo de cinco segundos.

O processamento digital das imagens recolhidas nas campanhas de medição, bem como o respetivo cálculo dos deslocamentos vertical e transversal do $\frac{1}{2}$ vão principal da P25A, foram efetuados em tempo diferido (não-real) com base no registo temporal das imagens recolhidas registado no relógio interno da câmara digital.

A determinação das coordenadas imagem dos alvos foi concretizada mediante as seguintes etapas sequenciais, ilustradas pela Figura 4.103:

- (i) definição do limite de *thresholding*, tendo em conta o número digital tipicamente associado aos alvos na sequência de imagens recolhidas;
- (ii) definição da área de interesse na imagem – associada ao referencial de medição com quatro alvos – recorrendo a indicação das coordenadas imagem do canto superior esquerdo e das dimensões da janelas de interesse, tendo em conta o deslocamento virtual expetável do referencial na imagem;
- (iii) para cada imagem constituinte de uma dada sequência:
 - a. abertura da imagem original e criação de sub-imagem associada ao referencial de medição;
 - b. *thresholding* da sub-imagem e execução de operação morfológica binária de fecho (erosão após dilatação) com base em elemento estruturante do tipo disco;
 - c. determinação dos centróides dos alvos na sub-imagem binária e transformação para o sistema de coordenadas imagem (completa).

A determinação das coordenadas imagem do alvo com base no respetivo centróide da sua imagem é justificada pela sua simplicidade e menor dimensão computacional do respetivo algoritmo de cálculo, comparativamente com outras abordagens de processamento de imagem alternativas, designadamente, o ajuste de forma geométrica elíptica. Nos casos em que a imagem do alvo constitui uma coroa circular (abertura da câmara igual a $f/16$ ou $f/5,6$), o ajuste por uma função gaussiana revela-se inadequado, notando-se que, para os restantes casos (abertura da câmara igual a $f/32$ ou $f/22$), a variação espacial dos números digitais na imagem do alvo é pouco significativa numa dimensão reduzida (o alvo apresenta uma dimensão aproximada de 15×15 píxeis na imagem), conduzindo a estimativas das coordenadas imagem com menor exatidão.

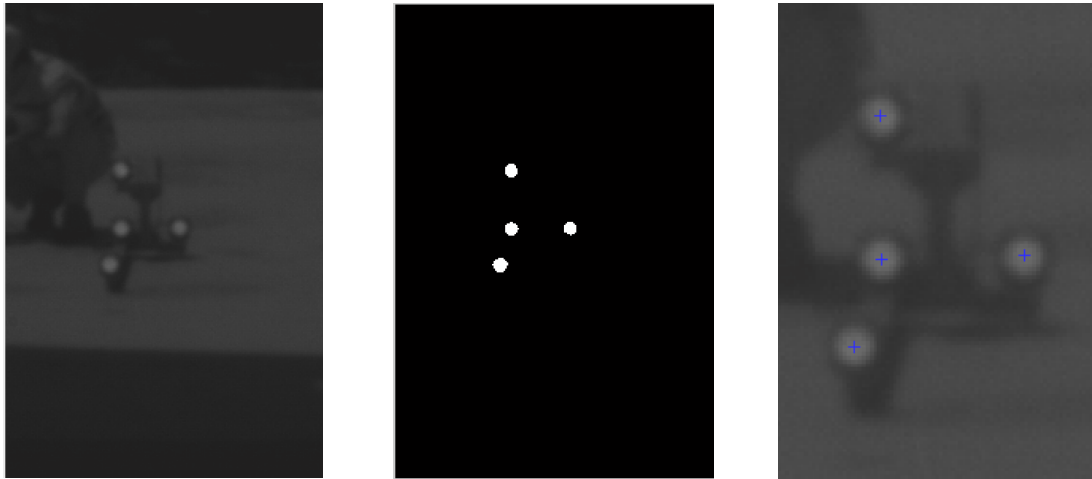


Figura 4.103: Etapas do processamento digital de imagem nos ensaios de medição de deslocamento: sub-imagem original (à esq.), sub-imagem binária (ao centro) e pormenor da localização dos centróides dos alvos na imagem original (à dir.).

Testes efetuados revelaram, em alguns casos, diferenças superiores a um píxel entre as localizações associadas ao centróide e ao máximo gaussiano do alvo.

Na prática, a principal dificuldade encontrada com a adoção do referido algoritmo de processamento digital de imagem esteve associada à definição do limite de *thresholding* da imagem, sobretudo, no caso das imagens obtidas com maior abertura ($f/5,6$), onde se notou a existência de reflexões dinâmicas de radiação infravermelha na superfície visível do rio Tejo (*vide* Figura 4.101). Neste caso, onde o número digital associado às reflexões na superfície do rio é próximo do observado para os alvos, foi necessário diminuir a janela de interesse na imagem e estabelecer uma abordagem segmentada e adaptativa da sua localização tendo em conta o deslocamento virtual dos alvos.

No que se refere à determinação da posição do centro de projeção da câmara, foi adotado um processo similar de otimização não-linear, descrito e validado anteriormente para o ensaio de calibração em campo do sistema de medição (*vide* secção 4.6.4). Deve-se salientar, contudo, uma modificação dos valores iniciais cuja atualização foi baseada nos valores de posição do centro de projeção obtidos na imagem anterior, com exceção da primeira imagem utilizada, onde se recorreu aos valores nominais da configuração geométrica estabelecida no processo de medição de deslocamento do 1/2 vão principal ($X_0 = 0$ m, $Y_0 = 62$ m, $Z_0 = 506$ m, $\omega = -0,11$ rad, $\varphi = 3,14$ rad, $\kappa = 0$ rad). O processamento das sequências de imagens nos ensaios de

medição realizados com base neste procedimento de cálculo não revelaram instabilidade numérica.

4.8.2 Deslocamento na ausência de tráfego ferroviário

O ensaio de medição de deslocamento do ½ vão principal da P25A na ausência de tráfego ferroviário foi realizado durante a campanha de inverno (em 2014-03-26), tendo-se promovido a aquisição de imagens no intervalo de tempo compreendido entre as 11:43 e as 11:46, na presença de tráfego rodoviário típico para um dia útil da semana. As condições ambientais registadas durante este ensaio na fundação da torre sul e no ½ vão principal são mencionadas no Quadro 4.59, salientando-se a inexistência de cobertura de nuvens e o início de sombreamento da fundação da torre sul por ação da incidência solar sobre a viga de rigidez da P25A.

Quadro 4.59: Valores médios e desvios padrão experimentais das condições ambientais.

Local da medição	Temperatura do ar (°C)	Humidade relativa (%)	Velocidade do vento (m·s ⁻¹)	Direção do vento	Pressão atmosférica (hPa)
½ vão principal	(12,6 ± 0,1)	(46,4 ± 2,3)	(3,5 ± 1,7)	Noroeste	1016
Fundação da torre sul	(14,2 ± 0,1)	(52,5 ± 1,3)	(7,3 ± 2,3)		1024

Na Figura 4.104 são apresentados os registos temporais das posições transversal e vertical do centro de projeção da câmara, os quais consideram-se representativos dos deslocamentos do ½ vão principal da P25A.

Os resultados obtidos permitiram observar a existência de deslocamentos máximos (valores pico-a-pico dados pela diferença entre posições máximas e mínimas observadas durante o intervalo de tempo de ensaio de medição) que corresponderam, aproximadamente, a 0,29 m na direção transversal e 0,53 m na direção vertical. Em ambos os registos de deslocamento notam-se movimentos oscilatórios de baixa frequência, típicos para este tipo de infraestrutura dinâmica (ponte suspensa com vão de elevada dimensão) [Rodrigues (2011-b)].

A reduzida duração das observações dimensionais impede a realização de uma análise dinâmica mais rigorosa e completa (com ensaio de vibração ambiente), nomeadamente, a determinação das principais frequências de vibração e amortecimento que caracterizam o comportamento dinâmico desta região estrutural da P25A.

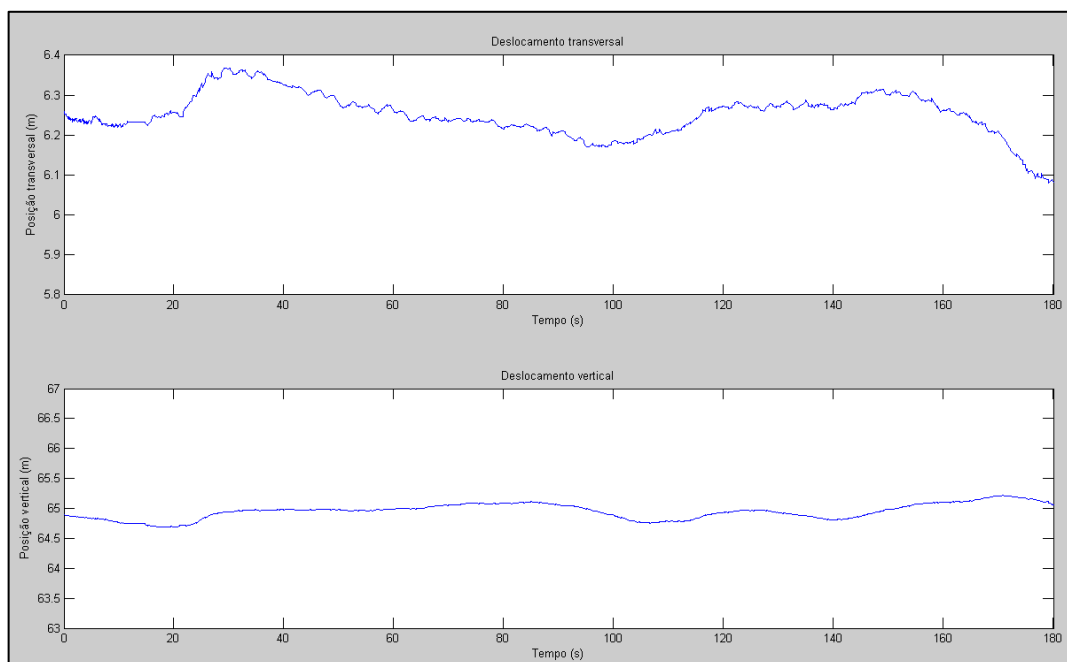


Figura 4.104: Deslocamentos transversal e vertical do ½ vão principal da P25A na ausência de tráfego ferroviário (2014-03-26, 11:43 – 11:46).

Por motivos logísticos, não foi possível quantificar os gradientes termohigrométricos verticais nos locais de instalação da câmara e do referencial de medição na P25A, pelo que não incluem correções do efeito sistemático da refração atmosférica das coordenadas mundo dos alvos. Atendendo à diferença reduzida de temperatura observada entre a fundação da torre sul e o ½ vão principal (próxima de 1,6 °C) e a existência de início de sombra sobre os alvos, é exetável uma influência pouco significativa da refração atmosférica no nível de exatidão da medição de deslocamentos realizada.

4.8.3 Deslocamento na presença de tráfego ferroviário

Os ensaios de medição de deslocamento do ½ vão principal da P25A na presença de tráfego ferroviário foram realizados em ambas as campanhas de medição (realizadas em 2013-07-18 e 2014-03-26) no fim do período da manhã de dias úteis da semana (entre as 11:30 e as 12:30), abrangendo os dois sentidos de circulação (sul-norte e norte-sul) no tabuleiro inferior da viga de rigidez.

O tráfego ferroviário referido correspondeu à circulação de comboio de passageiros de médio curso⁶ (modelo Série 3500-CP, ao serviço da Fertagus, ilustrado na Figura 4.105), sendo composto por quatro unidades motoras e atreladas, com um comprimento total de 106,6 m. A sua velocidade no tabuleiro inferior da P25A varia entre 40 km·h⁻¹ e 60 km·h⁻¹ [Rodrigues (2011-b)], apresentando uma carga de passageiros variável consoante a hora e o dia da semana (o valor máximo ocorre, em regra, ao início da manhã e no final da tarde dos dias úteis). No Quadro 4.60 são apresentadas as cargas de projeto associadas a este tipo de comboio de passageiros.



Figura 4.105: Passagem de comboio de passageiros no 1/2 vão principal da P25A.

Quadro 4.60: Cargas de projeto do comboio de passageiros Série 3500-CP.

Cenários de carga	Sem passageiros	Carga normal de passageiros	Carga máxima de passageiros	Sobrecarga de passageiros
Carga (kN)	2 207	608	794	862
Carga distribuída (kN·m ⁻¹)	20,7	5,7	7,4	8,1
Carga distribuída total (kN·m⁻¹)		26,4	28,1	28,8

No Quadro 4.61 são referidas as condições ambientais observadas durante os ensaios de medição de deslocamento nas duas campanhas de medição, salientando-se a inexistência de cobertura de nuvens e de sombra sobre os alvos, com exceção do ensaio n.º 6, o qual foi realizado em condições de início de sombreamento da fundação da torre sul devido à incidência solar sobre a viga de rigidez.

⁶ Note-se que, para além dos comboios de passageiros de médio curso, o tráfego ferroviário na P25A inclui igualmente comboios de passageiros de longo curso e comboios de carga, os quais não foram observados durante as campanhas de medição efetuadas.

Quadro 4.61: Condições ambientais registadas nos ensaios de medição de deslocamentos na P25A na presença de tráfego ferroviário.

N.º de ensaio	Local	Temperatura do ar (°C)	Humidade relativa (%)	Velocidade do vento (m·s ⁻¹)	Direção do vento	Pressão atmosférica (hPa)
1	½ vão principal	(19,4 ± 0,04)	(80,8 ± 0,4)	(1,1 ± 0,3)	Sudoeste	1009
	fundação torre sul	(30,9 ± 1,2)	(39,4 ± 4,5)	(0,6 ± 0,2)	Oeste	1017
2	½ vão principal	(18,7 ± 0,08)	(85,7 ± 0,6)	(2,3 ± 0,6)	Oeste	1009
	fundação torre sul	(28,8 ± 0,2)	(43,5 ± 1,3)	(1,1 ± 0,2)		1017
3	½ vão principal	(18,6 ± 0,02)	(84,1 ± 0,1)	(2,1 ± 0,5)	Oeste	1009
	fundação torre sul	(27,0 ± 0,5)	(49,3 ± 3,0)	(2,3 ± 1,5)		1017
4	½ vão principal	(12,5 ± 0,1)	(46,7 ± 1,2)	(3,8 ± 1,9)	Noroeste	1016
	fundação torre sul	(15,2 ± 0,7)	(48,9 ± 1,8)	(7,6 ± 1,1)		1024
6	½ vão principal	(12,5 ± 0,1)	(49,2 ± 0,7)	(5,2 ± 1,8)	Noroeste	1016
	fundação torre sul	(14,4 ± 0,2)	(50,3 ± 1,2)	(9,3 ± 1,6)		1024

No Quadro 4.62 são apresentados os valores máximos de deslocamentos transversal e vertical observados nos ensaios de medição que foram realizados na presença de tráfego ferroviário enquanto que as Figuras 4.106 a 4.109 mostram os registos das posições transversal e vertical do centro de projeção da câmara nos ensaios n.º 2 e n.º 3 (campanha de verão) e ensaios n.º 4 e n.º 6 (campanha de inverno), abrangendo os dois sentidos de circulação no tabuleiro inferior da viga de rigidez.

Quadro 4.62: Deslocamentos transversais e verticais máximos observados nos ensaios de medição realizados na presença de tráfego ferroviário.

Campanha de verão			Campanha de inverno		
N.º de ensaio	Deslocamento transversal máximo (m)	Deslocamento vertical máximo (m)	N.º de ensaio	Deslocamento transversal máximo (m)	Deslocamento vertical máximo (m)
1	0,17	1,66	4	0,39	1,69
2	0,20	1,67	5	Sem tráfego ferroviário	
3	0,23	1,76	6	0,26	1,62

Nos gráficos de deslocamento vertical das Figuras 4.106 e 4.107 (ensaios 2 e 3 realizados com abertura $f/22$ e $f/16$ e tempo de exposição de 20 ms) é notória a ausência de informação posicional no intervalo de tempo correspondente à passagem do comboio no ½ vão principal, justificada pelo efeito de arrastamento discutido anteriormente na secção 4.8.1. A adoção de maior abertura da câmara ($f/5,6$) e de tempo de exposição mais reduzido (2,5 ms) permitiu ultrapassar esta limitação, conforme se demonstra nos gráficos das Figuras 4.108 e 4.109 (ensaios n.º 4 e n.º 6)

onde é possível visualizar a evolução temporal das posições transversal e vertical durante a passagem de comboio no ½ vão principal.

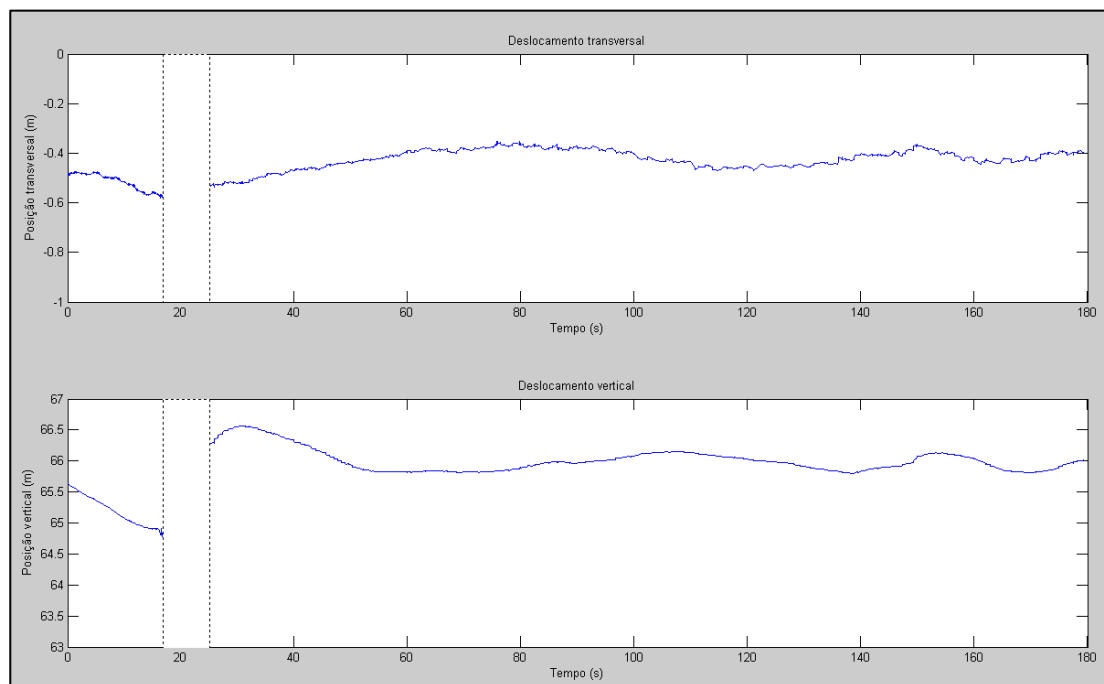


Figura 4.106: Deslocamentos transversal e vertical do ½ vão principal da P25A com passagem de comboio de passageiros no sentido sul-norte (ensaio n.º 3) no verão.

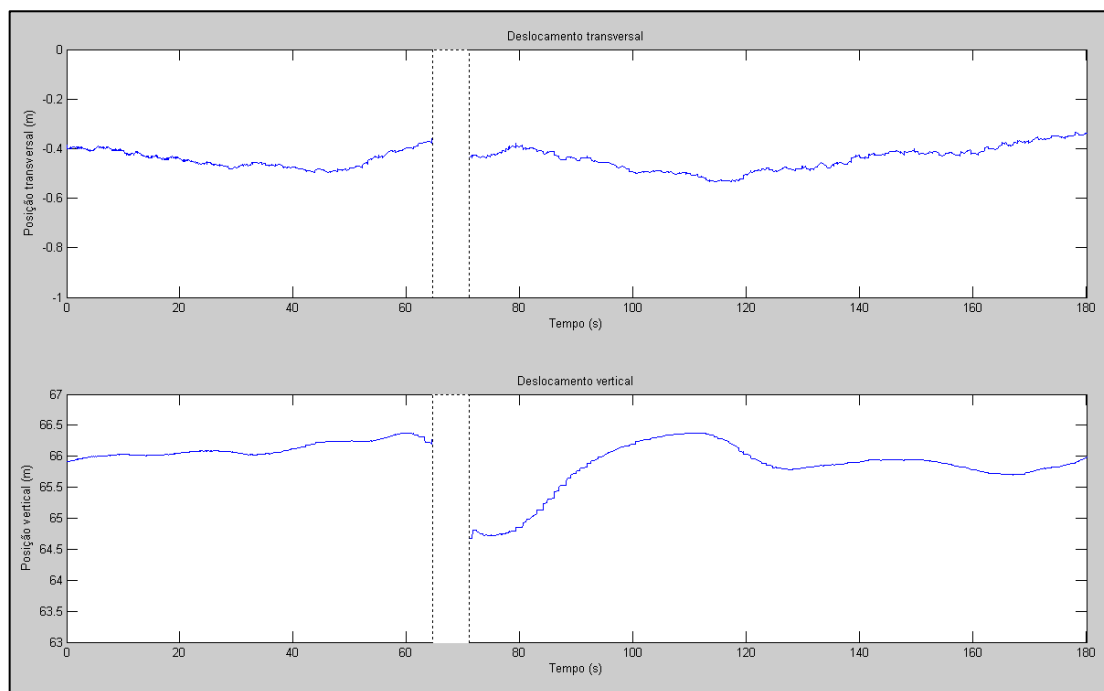


Figura 4.107: Deslocamentos transversal e vertical do ½ vão principal da P25A com passagem de comboio de passageiros no sentido norte-sul (ensaio n.º 2) no verão.

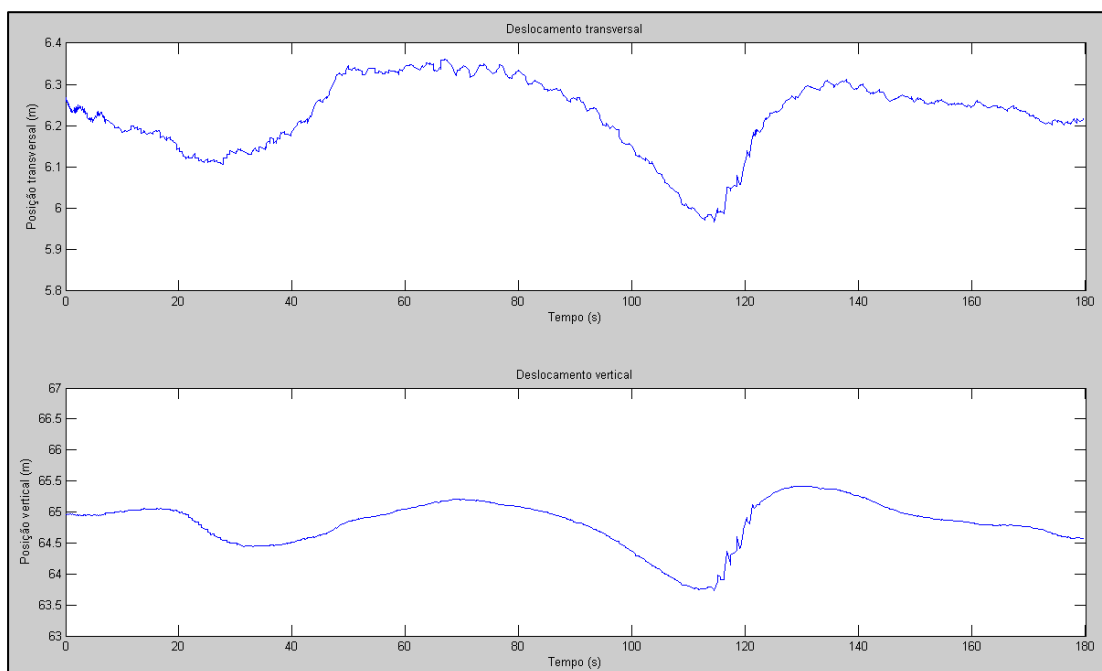


Figura 4.108: Deslocamentos transversal e vertical do 1/2 vão principal da P25A com passagem de comboio de passageiros no sentido sul-norte (ensaio n.º 4) no inverno.

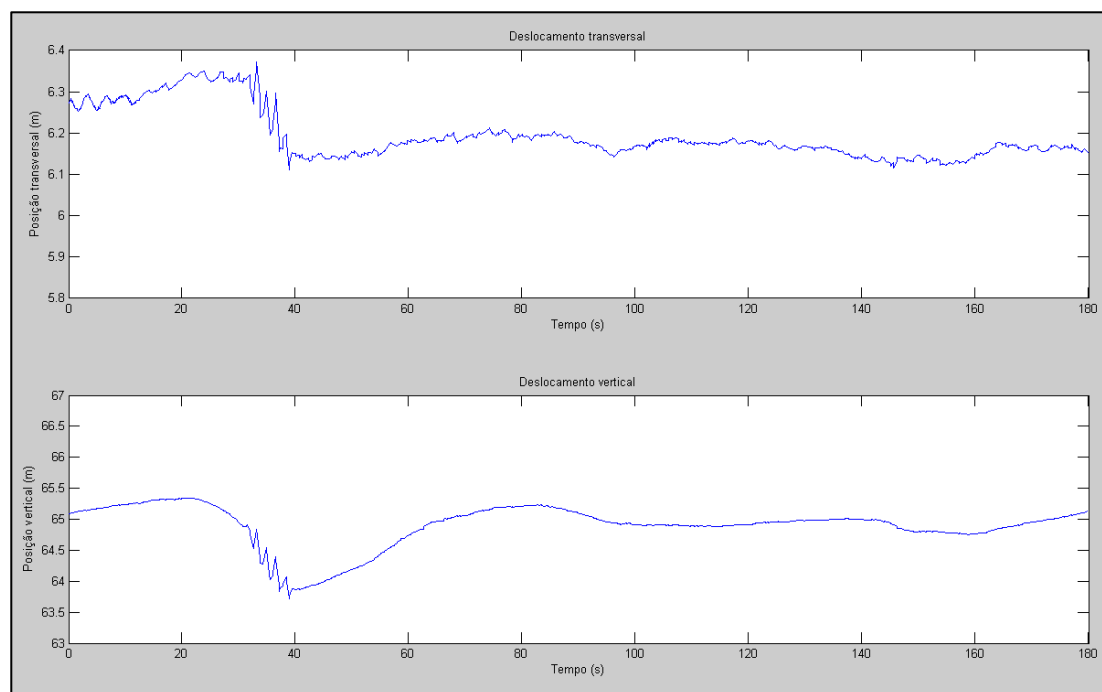


Figura 4.109: Deslocamentos transversal e vertical do 1/2 vão principal da P25A com passagem de comboio de passageiros no sentido norte-sul (ensaio n.º 6) no inverno.

Os resultados apresentados no Quadro 4.62 evidenciam uma proximidade entre os valores medidos nos diferentes ensaios notando-se que, na direção transversal, os deslocamentos máximos observados na campanha de inverno (ensaios n.º 4 e n.º 6) são superiores aos registados na campanha de verão (ensaios n.º 1 a n.º 3), facto que é igualmente verificado na ausência de tráfego ferroviário (*vide* secção 4.8.2).

Esta diferença pode ser justificada pela magnitude da velocidade do vento ao nível da viga de rigidez, que foi mais elevada na campanha de inverno (valores médios obtidos no ½ vão principal compreendidos entre $3,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $5,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, enquanto que na campanha de verão se situaram entre $1,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $2,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) evidenciando, deste modo, o impacto significativo da ação do vento enquanto ação estrutural na P25A, confirmada pela análise do deslocamento transversal registado nos ensaios n.º 2 e n.º 6 associados à circulação de comboio no sentido norte-sul do lado este da viga de rigidez.

Por se tratar de uma carga assimétrica relativamente ao eixo longitudinal da viga de rigidez, a passagem do comboio no ½ vão principal deveria originar um deslocamento transversal significativo no sentido oeste-este. A análise das Figuras 4.107 e 4.109 revela que tal só acontece no caso do ensaio n.º 6, dada a ação dinâmica do vento com um valor médio de $5,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (com direção noroeste), verificando-se que no ensaio n.º 2, a velocidade do vento apresentou um valor médio inferior ($2,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) na direção oeste.

A análise das Figuras 4.106 e 4.108 associadas aos ensaios n.º 3 e n.º 4 mostra que a contribuição dinâmica do vento para o deslocamento transversal da viga de rigidez é dominante. Considerando que nestes ensaios a circulação do comboio foi efetuada no sentido sul-norte do lado oeste, a correspondente carga assimétrica em relação ao eixo longitudinal da viga de rigidez deveria originar um deslocamento transversal relevante no sentido este-oeste. A Figura 4.108 (ensaio n.º 4) evidencia um sentido de deslocamento oposto nos momentos que antecedem a passagem do comboio no ½ vão principal, coincidente com a direção dinâmica do vento com a direção noroeste e um valor médio de $3,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Note-se que, nestas condições, o comboio de passageiros (circulação do lado oeste) está mais exposto à ação do vento na direção noroeste, salientando-se a elevada dimensão da sua superfície lateral (aproximadamente, 450 m^2), o que contribui para o papel dominante do vento em

relação ao deslocamento transversal. No caso do ensaio n.º 3, a Figura 4.106 não evidencia um efeito relevante do vento (com direção oeste) no deslocamento transversal, apresentando um valor médio mais reduzido ($2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Comparativamente com a situação operacional associada à ausência de tráfego ferroviário, os resultados obtidos não permitiram relacionar a circulação de comboio de passageiros com a magnitude do deslocamento transversal observado, dado o reduzido número de ensaios realizados (três) em condições ambientais similares (ensaios n.º 4 a n.º 6) verificando-se que, num dos casos (comparação entre os ensaios n.º 4 e n.º 5) observou-se um aumento da magnitude igual a 0,10 m, enquanto que, no outro caso (comparação entre ensaios n.º 6 e n.º 5), este originou um decréscimo de 0,03 m.

Na direção vertical registaram-se diferenças significativas entre as duas situações operacionais estudadas, verificando-se que a circulação do comboio de passageiros originou um acréscimo da ordem de 1,2 m no deslocamento máximo observado. As Figuras 4.108 a 4.109 permitem observar que, com o tráfego ferroviário, a posição vertical mínima (correspondente à flecha máxima de deformação) é atingida no instante que antecede a passagem do comboio no sentido sul-norte enquanto que, no sentido oposto, ocorre no instante seguinte à passagem do comboio. Este facto determina que o sentido de circulação do comboio possa ser identificado mediante uma análise do registo de deslocamento vertical, sendo justificado pelo ligeiro afastamento da câmara em relação à localização exata da secção central do ½ vão principal.

Nos ensaios de carga distribuída realizados em 1999 (conforme descrito em [Castanheta (1999)]), foi observada uma flecha vertical descendente de 2,37 m e uma contraflecha ascendente de 0,78 m no ½ vão principal da P25A, ou seja, um deslocamento vertical máximo (pico-a-pico) de 3,15 m, mediante posicionamento estático diferenciado de carga distribuída de $77,5 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ (comboio de carga) no tabuleiro inferior da viga de rigidez, em situação operacional de tráfego rodoviário condicionado no tabuleiro superior (apenas duas das seis vias de circulação estavam abertas ao tráfego durante os ensaios). Neste contexto, assume particular interesse a comparação entre os resultados dos ensaios de carga de 1999 e os valores de deslocamento vertical obtidos nas campanhas de medição mencionadas anteriormente,

o qual é possível considerando, numa primeira aproximação, um comportamento estrutural linear da viga de rigidez.

A análise das posições verticais extremas associadas à flecha e posterior contraflecha produzidas pela circulação do comboio de passageiros (ilustradas nas Figuras 4.108 a 4.109) revela um valor médio de 1,68 m para o deslocamento vertical máximo (pico-a-pico) o que, tendo em conta a relação observada entre carga distribuída e deslocamento vertical máximo determinada em 1999, permite estimar uma carga distribuída de $41,3 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ durante as recentes campanhas de medição.

O valor calculado corresponde, aproximadamente, a duas vezes a carga distribuída associada ao comboio de passageiros ($20,7 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ sem passageiros e $26,4 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ para carga normal, *vide* Quadro 4.60). Esta diferença é justificada pelos diferentes cenários operacionais de tráfego rodoviário nas duas situações analisadas (condicionado em 1999 e normal durante as recentes campanhas de medição) e pela natureza diferenciada dos ensaios realizados (nos ensaios de carga realizados em 1999, a carga distribuída foi aplicada mediante posicionamento estático de comboio de carga no tabuleiro e não por circulação sobre o $\frac{1}{2}$ vão principal da P25A).

Assinala-se como conclusão parcelar o facto do sistema de medição ter revelado uma elevada sensibilidade de medição do deslocamento vertical, permitindo diferenciar o número de carruagens (quatro) que compunham os comboios de passageiros observados no registo, conforme se mostra nas Figuras 4.110 e 4.111, permitindo associar picos ascendentes e descendentes de deslocamento relacionados com a passagem dos trens de rodas (assinalada a vermelho) e da região central das diversas carruagens (assinaladas a verde) sobre o vão suspenso.

Considera-se, também, de interesse referir que o conhecimento dos instantes de tempo associados ao início e fim da passagem do comboio no $\frac{1}{2}$ vão principal, bem como do seu comprimento total (106,6 m), permitem estimar a velocidade de circulação no tabuleiro inferior da P25A (*vide* Quadro 4.63). Salienta-se que estas estimativas de velocidade de circulação de comboio, apresentadas no Quadro 4.63, são similares às obtidas com base em registos extensométricos do vão principal da P25A (compreendidas entre $40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ e $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) [Rodrigues (2011-b)].

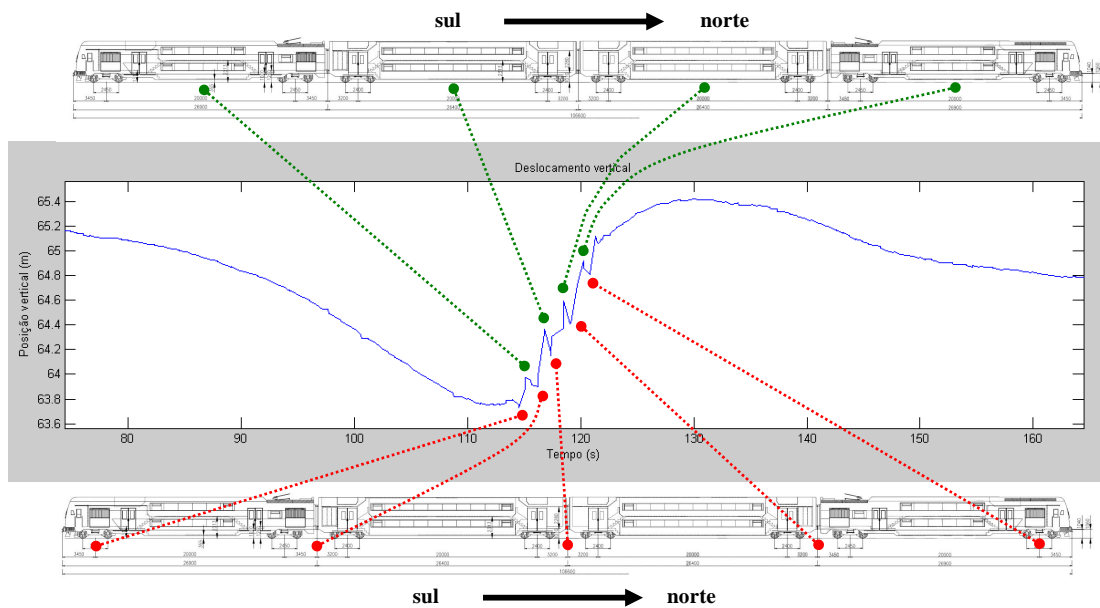


Figura 4.110: Pormenor do deslocamento vertical (sentido norte-sul – ensaio n.º 6).

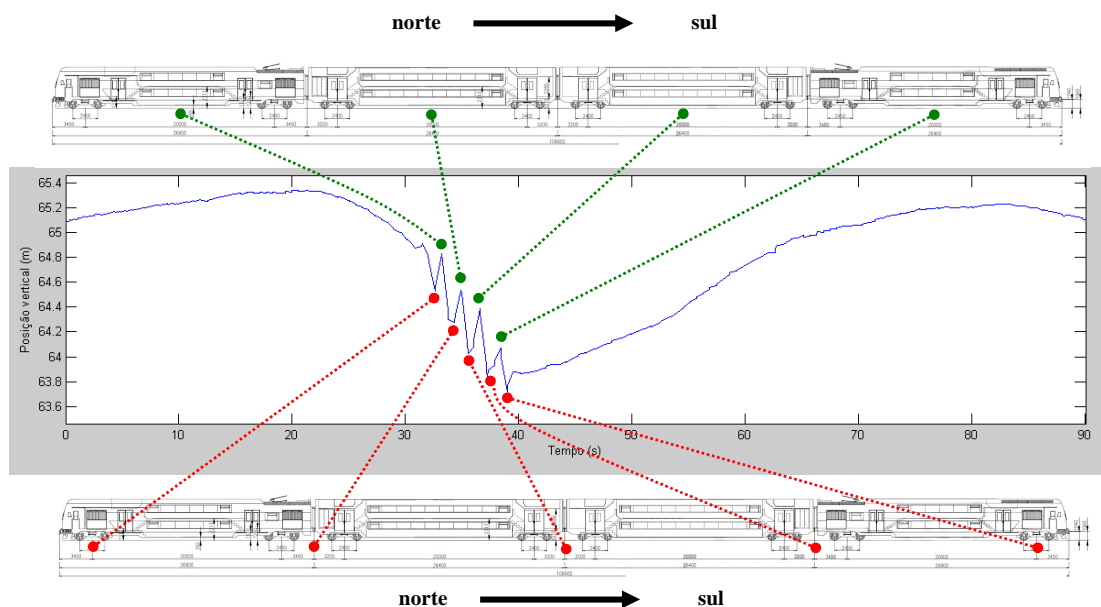


Figura 4.111: Pormenor do deslocamento vertical (sentido sul-norte – ensaio n.º 4).

Quadro 4.63: Velocidade de circulação de comboio estimada com base no registo temporal de posição vertical.

N.º de ensaio	Sentido de circulação	Tempo de início de passagem (s)	Tempo de fim de passagem (s)	Velocidade de circulação (km·h ⁻¹)
1	norte-sul	132,70	139,08	60
2	norte-sul	63,22	72,33	42
3	sul-norte	16,52	25,22	44
4	sul-norte	114,00	122,60	45
6	norte-sul	30,89	39,56	44

Estes resultados permitem estimar, de forma aproximada, a posição longitudinal do comboio de passageiros na viga de rigidez, assumindo uma velocidade de circulação constante e tendo em conta o instante inicial de passagem do comboio no ½ vão principal (associado à flecha de deformação máxima) e as dimensões nominais da P25A, conforme se mostra no Quadro 4.64 e nas Figuras 4.112 e 4.113.

Quadro 4.64: Instante de tempo de passagem do comboio na viga de rigidez.

Sentido sul-norte										
Local	P1	P2	½ P2-P3	P3	½ P3-P4	P4	½ P4-P5	P5	P6	P7
Ensaio 4	24,49 s	33,44 s	51,94 s	71,44 s	112,30 s	153,16 s	172,66 s			
Sentido norte-sul										
Local	P7	P6	P5	½ P5-P4	P4	½ P4-P3	P3	½ P3-P2	P2	P1
Ensaio 6						40,16 s	81,35 s	101,01 s	120,67 s	128,69 s

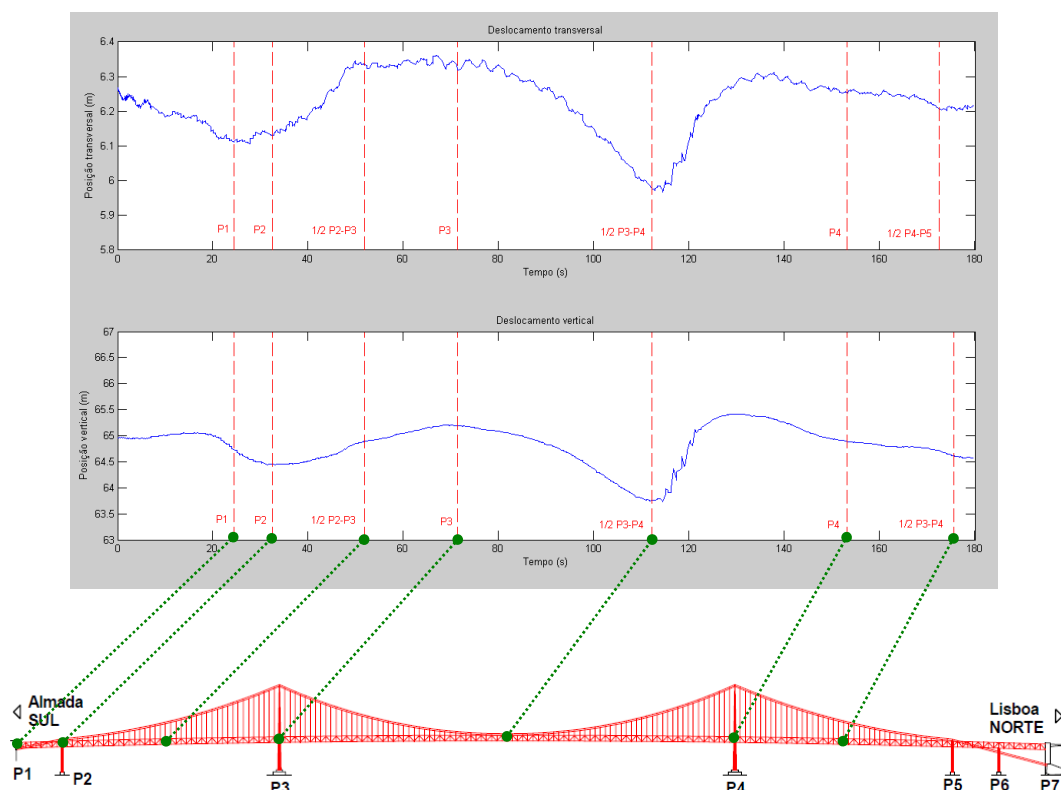


Figura 4.112: Estimativa da posição longitudinal de comboio (sentido sul-norte, ensaio n.º 4)

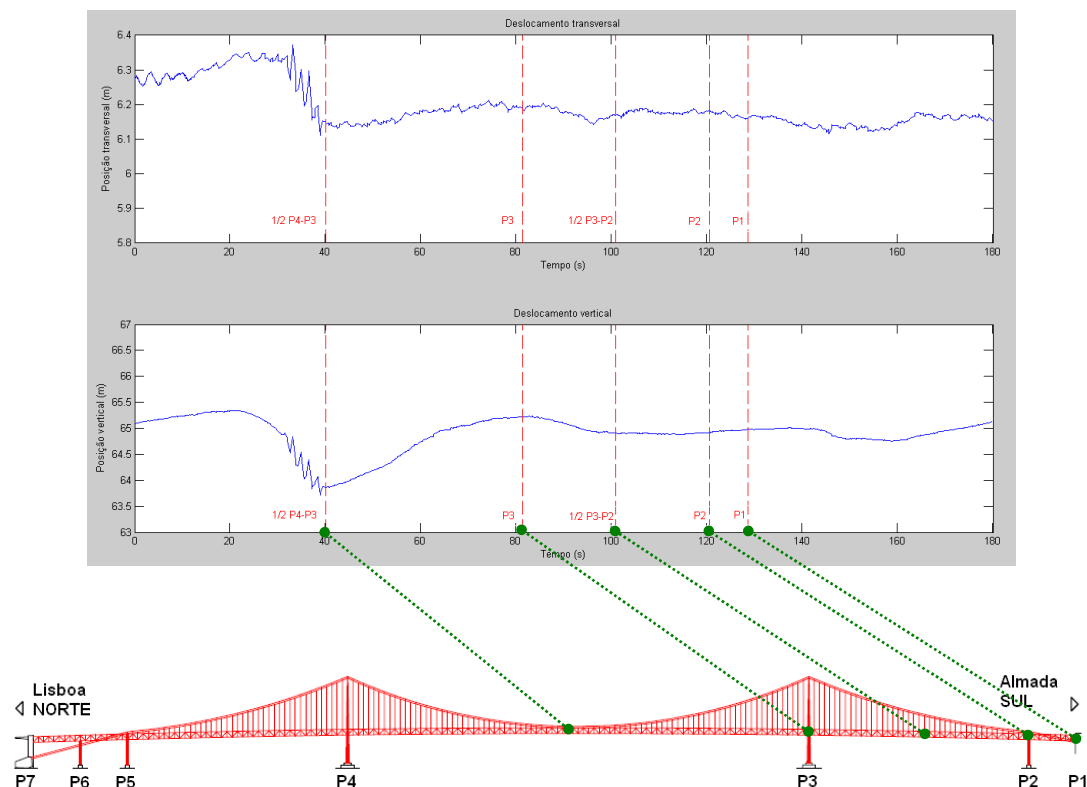


Figura 4.113: Estimativa da posição longitudinal de comboio (sentido norte-sul, ensaio n.º 6).

A análise mais detalhada da Figura 4.112 (circulação do comboio no sentido sul-norte) revela que a entrada do comboio na viga de rigidez (P1) origina um movimento descendente da região do $\frac{1}{2}$ vão até ao momento em que atinge o início do vão lateral (P2), a partir do qual o movimento vertical do $\frac{1}{2}$ vão principal passa a ser ascendente. Quando o comboio entra na região do vão principal (P3), inicia-se um movimento descendente que apenas é invertido quando o comboio passa pelo $\frac{1}{2}$ vão principal, alcançando a flecha de deformação máxima. Em seguida, inicia-se uma rápida ascensão do $\frac{1}{2}$ vão, obtendo-se a contraflecha de deformação máxima quando o comboio se localiza, aproximadamente a $\frac{1}{4}$ do vão principal, descendo lentamente nos momentos seguintes.

A Figura 4.113, relativa à circulação no sentido norte-sul, mostra uma subida gradual do $\frac{1}{2}$ vão principal quando o comboio se localiza, aproximadamente, a $\frac{1}{4}$ de vão principal iniciando, nesse momento, uma descida até ser atingida a flecha de deformação máxima no instante de passagem pelo $\frac{1}{2}$ vão principal. Em seguida, assiste-se a um movimento ascendente com um ponto de inflexão associado à passagem do comboio por $\frac{1}{4}$ de vão principal, atingindo uma posição ascendente

máxima quando o comboio passa pela região da torre sul (P3). Segue-se uma descida do $\frac{1}{2}$ vão principal até à passagem pelo $\frac{1}{2}$ vão lateral verificando-se que a partir deste momento, a posição vertical do $\frac{1}{2}$ vão principal não apresenta movimentos significativos.

Um aspeto final que importa realçar é a proximidade existente entre os registos de deslocamento vertical (medido com recurso ao sistema óptico) e os de extensão (obtido por extensómetros elétricos que integram o atual sistema de observação) [Rodrigues (2011-b)] relativos ao $\frac{1}{2}$ vão principal da P25A, conforme se mostra na Figura 4.114. Esta proximidade do registo de deslocamento vertical é notada sobretudo nas curvas de extensão (e5 a e8, *vide* Figura 4.114) associadas à região superior da viga de rigidez.

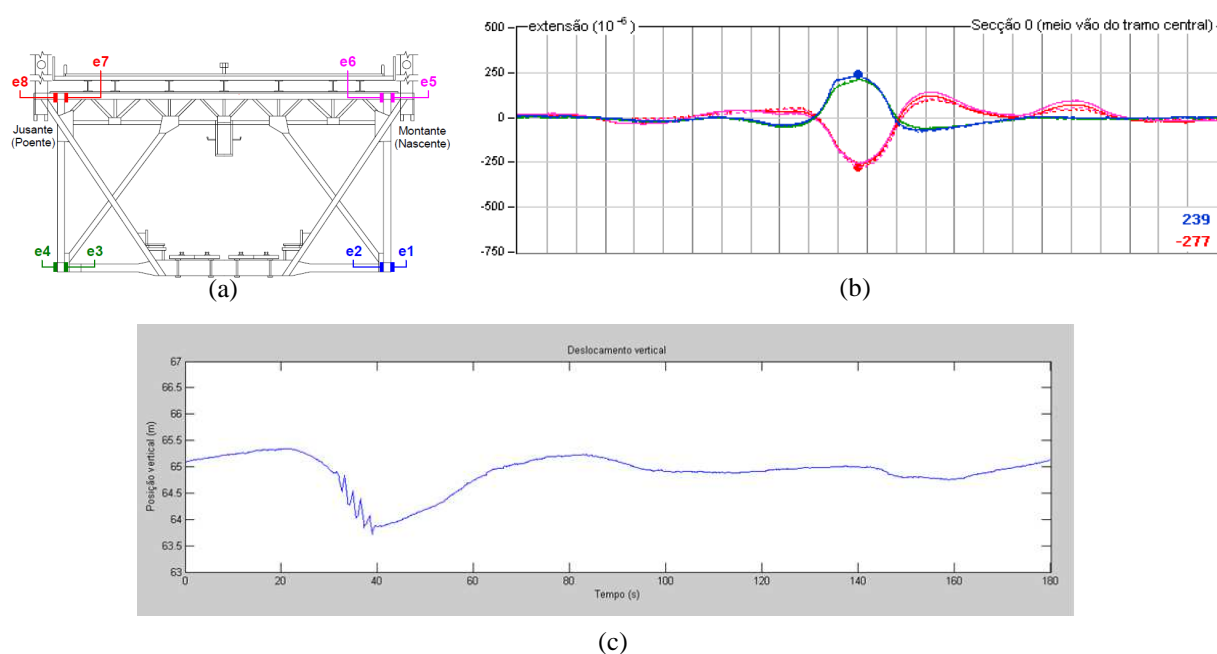


Figura 4.114: (a) Rede de extensómetros instalados no $\frac{1}{2}$ vão principal; (b) Exemplo de registo temporal de extensão no $\frac{1}{2}$ vão principal com passagem de comboio no sentido norte-sul; (c) Exemplo de registo temporal de deslocamento vertical do $\frac{1}{2}$ vão principal com passagem de comboio no sentido norte-sul.

A aplicação da abordagem proposta ao problema da observação dimensional dinâmica de uma ponte suspensa mostrou como permite fazer uma avaliação rigorosa do comportamento dinâmico de estruturas terrestres com elevada dimensão, bem como, as limitações de exatidão inerentes à aplicação neste contexto, contribuindo para um aprofundado conhecimento das condições e soluções para se estabelecer um enquadramento generalizado de atuação em trabalhos futuros.

5. CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE EVOLUÇÃO FUTURA

5.1 *Considerações globais*

Este trabalho evidenciou o relevante contributo da Metrologia Óptica para o desenvolvimento de uma solução de visão computacional para medição dimensional terrestre de infraestruturas dinâmicas no contexto da Engenharia Civil, e dos fundamentos e métodos necessários ao julgamento da sua adequação para cumprimento dos requisitos de medição estabelecidos para o cenário de observação. Em acréscimo, foi igualmente desenvolvido o suporte experimental exigido para evidência da qualidade metrológica obtida, mediante integração do sistema de medição estudado em cadeia de rastreabilidade dimensional do SI e avaliação das respetivas incertezas de medição, seguindo as atuais orientações internacionais centradas no conceito probabilístico da medição. Este último contributo da Metrologia Óptica surge, tradicionalmente, após a conclusão do processo de desenvolvimento de um sistema de medição, contudo, neste trabalho foi possível ilustrar como as referidas atividades de cariz metrológico têm um relevante papel na validação experimental da abordagem de medição e melhoria do seu nível de exatidão dimensional ainda numa fase prévia de investigação e desenvolvimento.

A aplicação da metodologia proposta ao cenário de observação de uma ponte suspensa com elevada dimensão (a P25A) permitiu a medição dinâmica do deslocamento transversal e vertical do seu $\frac{1}{2}$ vão principal em diferentes épocas do ano e com solicitações operacionais distintas associadas aos tráfegos ferroviário e rodoviário. No caso particular do deslocamento vertical, os resultados das medições foram coerentes relativamente ao registo histórico de deslocamento observado nos ensaios de carga distribuída realizados em 1999. Esta coerência entre resultados de medições dimensionais disponíveis para o $\frac{1}{2}$ vão principal da P25A é confirmada pela proximidade constatada entre os registos atuais de deslocamento vertical (medido com o sistema óptico) e de extensão obtida com base em rede local de extensómetros elétricos.

A elevada sensibilidade de medição obtida, sobretudo, a nível vertical e na ocorrência de tráfego ferroviário, permitiu identificar o número de carruagens que compunham o comboio de passageiros observado, bem como determinar a

correspondente velocidade e sentido de circulação. Nesta situação operacional, os parâmetros de abertura da câmara e tempo de exposição do sensor de imagem foram determinantes para a obtenção de imagens com resolução espacial adequada à extração das coordenadas da imagem dos alvos. O estabelecimento de uma abertura mais elevada e um tempo de exposição mais reduzido evitou o efeito de *blurring* na imagem associado à rápida variação espacial vertical da viga de rigidez durante a passagem de comboio no ½ vão principal.

Contudo, no que diz respeito ao deslocamento longitudinal, a elevada incerteza de medição obtida no ensaio de calibração para esta direção de deslocamento, não permitiu concretizar esta medição com o rigor dimensional exigido, mesmo em condições de observação mais favoráveis (durante o inverno). Esta situação, já prevista na fase de projeto do sistema de medição, decorreu do alinhamento longitudinal da câmara e do referencial de medição em relação à viga de rigidez da P25A, do qual resulta uma reduzida sensibilidade de medição. No caso particular da P25A, a existência de instrumentação complementar – cadeias elétricas com transdutores de deslocamento unidirecionais – ao nível dos encontros da viga de rigidez com as ancoragens permite conhecer, com maior exatidão, o deslocamento longitudinal desta ponte suspensa.

No caso da observação dimensional de pontes, este facto constitui uma limitação do método de medição proposto que apenas pode ser minimizada com sistema óptico caracterizado por uma distância focal mais elevada (sob condição de garantia de produção de campo de visão satisfatório) ou com sensor de imagem com dimensão de píxel mais reduzida, o que se traduz numa melhoria da resolução espacial da imagem dos alvos a qual permitiria, eventualmente, uma análise individual do centro geométrico de cada LED constituinte do alvo em vez da totalidade do alvo. O posicionamento alternativo do referencial de medição em posição espacial desfavorável ao alinhamento longitudinal (por exemplo, numa margem do rio, dada a limitada dimensão transversal da fundação da torre) resulta, inevitavelmente, numa maior distância de observação e perda de sensibilidade de medição nas restantes direções de deslocamento.

A concretização experimental da abordagem proposta mostrou ser possível assegurar uma ligação rígida entre a câmara e a região inferior da viga de rigidez da P25A, aspeto crucial para que a variação espacial do centro de projeção da câmara

seja representativa do deslocamento da infraestrutura observada. A elevada rigidez do local de instalação e a utilização de materiais de isolamento na interface viga de rigidez / estrutura de alojamento da câmara justificam a ausência de transmissão de elevadas frequências de vibração com efeito prejudicial sobre as imagens adquiridas. Neste âmbito, os componentes ópticos e fotónicos da câmara mostraram uma adequada resistência aos efeitos dinâmicos, embora a duração da sua exposição operacional tenha sido reduzida não permitindo uma avaliação a longo prazo. Neste âmbito, recomenda-se que estes elementos constituintes do sistema sejam previamente sujeitos a ensaio dinâmico, seguindo o atual enquadramento normativo (ISO 9022-22:2012), de forma a avaliar a sua resistência a vibração aleatória.

A aplicação do método DOE na parametrização intrínseca da câmara com elevada distância focal (600 mm) revelou-se bem sucedida, aspeto que era essencial para a concretização da abordagem de medição proposta. Este método demonstrou um potencial de aplicação ao nível de teleobjetivas, incluindo as do tipo *zoom* (com distância focal variável), dependente da disponibilidade de rede difração apropriada. Permitiu, igualmente, confirmar o impacto negligenciável da distorção radial da teleobjetiva na exatidão das coordenadas imagem nos processos de parametrização e de medição, contribuindo para a simplificação dos modelos matemáticos e melhoria de estabilidade numérica.

Concluiu-se, igualmente, que a posição de focagem no infinito na objetiva determina diferentes estimativas e incertezas de medição dos parâmetros intrínsecos, sobretudo, na ausência de marcações e posições de fixação mecânica do anel de ajustamento de focagem. Este aspeto deve assim ser considerado no processo de seleção de objetiva, de forma a melhorar a estabilidade dos parâmetros intrínsecos no transporte do laboratório para obra minimizando, durante a observação dimensional, a possibilidade de alteração dos parâmetros. Ensaaios de parametrização intrínseca realizados previamente e posteriormente às duas campanhas de medição efetuadas não revelaram alterações significativas nas estimativas dos parâmetros intrínsecos. Contudo, a reduzida duração (cerca de ½ dia) dos ensaios pontuais de medição dimensional no meio dinâmico da P25A, não permitem tirar conclusões rigorosas sobre a estabilidade geométrica da câmara a longo prazo.

As incertezas de medição e correlações quantificadas para os parâmetros intrínsecos de interesse – distância focal e coordenadas imagem do ponto principal –

tiveram pouco impacto na incerteza combinada de medição de deslocamento decorrendo, sobretudo, da componentes de incerteza associadas à determinação das coordenadas imagem dos pontos de difração, nomeadamente, ao processamento digital de imagem e à montagem experimental efetuada.

O processo de otimização não-linear multivariável, associado quer à parametrização intrínseca da câmara quer à abordagem de medição de deslocamento, não revelou problemas de instabilidade de natureza numérica, apresentando rápida convergência para as soluções finais (parâmetros intrínsecos e posição espacial do centro de projeção da câmara), tendo em conta os respetivos critérios de paragem previamente definidos. Deste modo, constitui uma abordagem alternativa à via analítica de resolução das equações de colinearidade pelo MMQ que, no caso das câmaras com elevada distância focal, se revela numericamente instável ao constituírem sistemas mal-condicionados e sensíveis a pequenas perturbações em relação ao comportamento ideal (colinearidade) dos feixes luminosos.

O estudo do efeito da refração vertical na medição óptica a longa distância permitiu concluir que se trata de um fenómeno atmosférico com impacto considerável no nível de exatidão da posição espacial da câmara e, consequentemente, do deslocamento medido. A elevada variabilidade termohigrométrica temporal e espacial registada no cenário de observação estudado, mostrou como a magnitude desse impacto está dependente das condições momentâneas de observação, em particular, da estação do ano, da altura do dia e da existência de sombra sobre os alvos. No caso da P25A, a incidência solar diferenciada entre a fundação da torre e a região inferior da viga de rigidez foi traduzida em comportamentos térmicos distintos: na fundação, a evolução vertical da temperatura do ar mostrou-se claramente não-linear, seguindo um modelo paramétrico de potência mesmo em época de inverno; na região inferior da viga de rigidez, a distribuição vertical da temperatura do ar foi linear. Consequentemente, a variação vertical do índice de refração em ambas as regiões refletiu os comportamentos térmicos referidos anteriormente, conduzindo à aplicação de abordagem geodésica não-linear para determinação de ângulo e desvio de refração vertical. O sistema de medição concretizado na P25A mostrou-se sensível ao fenómeno de refração vertical visto que, em situações de gradiente térmico vertical elevado entre os alvos e a câmara, os ângulos de refração vertical apresentaram uma magnitude superior ao campo de visão instantâneo (IFOV) da câmara aplicada.

A correção deste efeito sistemático, por conhecimento aproximado das estimativas dos desvios verticais por refração das coordenadas mundo dos alvos nos ensaios de calibração *in situ* efetuados, conduziu a reduções significativas nas magnitudes dos desvios verticais de calibração, demonstrando a sua eficácia na melhoria da exatidão do sistema de medição. A posterior avaliação de incertezas de medição referente às coordenadas mundo dos alvos mostrou que, num cenário de observação com condições favoráveis à manifestação do fenómeno de refração (em período diurno no verão, por exemplo), a incerteza de medição da correção de refração é uma das contribuições dominantes para a incerteza combinada da coordenada mundo vertical, evidenciando o cuidado especial a ter na aplicação de correções e justificando, em caso de observação dimensional permanente, o desenvolvimento complementar de sistema de medição termohigrométrica vertical que permita a sua quantificação em tempo real. A ausência de correção deste efeito ambiental sistemático conduz a um aumento de incerteza de medição das coordenadas mundo verticais dos alvos que afeta consideravelmente o nível de exatidão dimensional.

Na fase de projeto do sistema é igualmente possível mitigar o efeito da refração vertical mediante um maior afastamento do referencial em relação à superfície de apoio ou mediante a concretização de uma estrutura de proteção contra a radiação proveniente da superfície, de modo a diminuir o gradiente térmico vertical do ar na região inicial do trajeto de propagação dos feixes luminosos dos alvos. Esta redução do gradiente térmico terá igualmente um impacto positivo ao nível da mitigação do efeito de feixe errante por turbulência, contribuindo para a melhoria do nível de exatidão associado às coordenadas imagem dos alvos e, consequentemente, da medição dimensional.

Como era expetável, o meio de propagação estudado – camada de ar atmosférico com dimensão vertical na ordem de grandeza das dezenas de metros – revelou-se propício à ocorrência de turbulência atmosférica, sobretudo, nas regiões caracterizadas por elevados gradientes térmicos verticais, como foi o caso da região próxima da fundação da torre na P25A. Nos ensaios de feixe errante realizados neste cenário de observação foram encontradas diferenças significativas no que respeita à estabilidade das coordenadas imagem dos alvos, notando-se uma dependência da sua

magnitude em relação à época do ano considerada e à existência de sombra sobre os alvos.

A avaliação de incertezas de medição de deslocamento, nomeadamente, a análise de sensibilidade realizada, mostrou que a dispersão dos valores das coordenadas imagem dos alvos, decorrente do efeito de feixe errante por turbulência, constitui a principal contribuição para a incerteza combinada de medição da posição espacial da câmara pelo que, os eventuais esforços de melhoria de exatidão dimensional do método de medição proposto deverão ser desenvolvidos prioritariamente a este nível.

As observações realizadas nos ensaios de campo não permitiram tirar conclusões acerca da eficácia dos esforços efetuados (emissão de radiação no comprimento de onda do infravermelho próximo – 875 nm – e ajuste da intensidade energética dos LEDs nos alvos) no sentido de minimizar o fenómeno de atenuação atmosférica por efeito de absorção e dispersão, nomeadamente, na presença de nevoeiro ou chuva intensa, visto que todos os ensaios de campo foram efetuados na ausência destas duas ocorrências, tendo-se registado condições favoráveis de visibilidade (ar límpido).

A caracterização dimensional do referencial de medição, efetuada a nível laboratorial com recurso a MMC 3D, assegurou adequadamente a medição das coordenadas mundo dos alvos ativos compostos por LEDs, com uma reduzida incerteza de medição. A principal contribuição para a incerteza a nível transversal e longitudinal reside no fenómeno de expansão ou contração linear térmica por exposição do referencial às condições ambientais do cenário de observação enquanto que, a nível vertical, a contribuição mais significativa está associada ao fenómeno de refração atmosférica. Contudo, notou-se também uma contribuição substancial do desvio de circularidade do alvo, que poderá ser minimizada mediante aumento do número de LEDs medidos por alvo, do número de pontos medidos na superfície semiesférica do LED e do maior rigor dimensional no processo de produção dos alvos. No que respeita ao transporte e montagem do referencial na fundação da P25A, a sua influência nas coordenadas mundo dos alvos foi reduzida, garantindo-se a integridade espacial do referencial na realização dos ensaios de campo.

O processo de calibração desenvolvido mostrou-se funcional para a avaliação da exatidão dimensional *in situ* do sistema de medição nas magnitudes de deslocamento de 250 mm e 350 mm, sendo eventualmente extensível a outros valores (maiores ou menores) de magnitude de deslocamento que se considerem relevantes. Os desvios de calibração obtidos apresentaram uma ordem de grandeza milimétrica, notando-se a obtenção de menores desvios em cenário de observação mais favorável (na época de inverno), justificada por um menor efeito de feixe errante decorrente de um gradiente térmico menos significativo junto aos alvos posicionados na fundação da torre, pelo aumento de experiência dos operadores (salienta-se que o ensaio de inverno foi o segundo ensaio de calibração *in situ* realizado na P25A), e pela melhoria substancial da qualidade de imagem em virtude da adoção de abertura de câmara mais elevada e menor tempo de exposição no sensor, que promoveram uma melhoria na resolução espacial dos alvos.

O protótipo de padrão de referência – dispositivo de transferência com montagem do referencial de medição em posições de referência – evidenciou um nível de exatidão da medição de deslocamento superior ao obtido para o sistema de medição em condições favoráveis de calibração em campo (no inverno) pelo que se justifica a sua classificação como padrão de medição itinerante entre o laboratório metrológico com rastreabilidade dimensional e a obra observada. Contudo, neste âmbito notou-se alguma vulnerabilidade dimensional no que respeita à influência do operador na montagem do referencial nas diversas posições de referência no dispositivo de transferência, evidenciado pela obtenção de desvios de retorno a zero mais baixos no segundo ensaio de calibração realizado (no inverno) com o natural acréscimo de experiência operacional em campo.

As conclusões obtidas acerca da influência dos fenómenos de refração e turbulência atmosférica no processo de medição proposto, determinam que o ensaio de calibração *in situ* do sistema de medição seja realizado em condições favoráveis (embora não controláveis) de observação, nomeadamente, durante a época de inverno em período noturno ou diurno, na proximidade da aurora ou do ocaso, e na ausência de ações estruturais significativas (vento e tráfego, por exemplo) e de incidência solar direta sobre a região de instalação dos alvos. Recomenda-se, igualmente, a aplicação de correções relativas ao efeito da refração atmosférica nas coordenadas mundo dos alvos.

Ao nível do processo de avaliação das incertezas de medição destaca-se o papel fundamental do MMC na concretização bem sucedida de abordagem funcional de propagação de incertezas entre grandezas de entrada e de saída (desvios de calibração), designadamente, nos processos de cálculo com otimização não-linear multivariável iterativa na parametrização intrínseca e na determinação da posição espacial do centro de projeção da câmara, para os quais se desconhece uma alternativa viável.

Tendo em conta a combinação probabilística da melhor capacidade de calibração obtida para o sistema de medição testado na P25A (no ensaio realizado em condições favoráveis no inverno), da magnitude dos respetivos desvios de calibração quantificados nesse processo e do intervalo de variação da incerteza de medição da posição espacial da câmara, o nível de exatidão (num intervalo de confiança de 95%) associado à medição de deslocamento vertical e transversal do $\frac{1}{2}$ vão principal da P25A situa-se, numa primeira aproximação, entre 4 mm e 7 mm, para o intervalo de variação de condições ambientais registadas, de forma pontual, nas épocas de inverno e no verão, respetivamente. Este intervalo é considerado satisfatório em relação ao requisito de exatidão dimensional de 10 mm estabelecido no âmbito da análise estrutural dinâmica do $\frac{1}{2}$ vão principal da P25A, pelo que o grau de maturação tecnológica do sistema de medição óptica desenvolvido se considera adequado à realização de observações dimensionais pontuais (não-permanentes), por exemplo, em ensaios de receção.

Salienta-se, no entanto, a possibilidade de ocorrência de cenário de observação na época de verão com temperaturas do ar substancialmente superiores às observadas neste estudo, o que aumentará o limite superior do intervalo de exatidão mencionado anteriormente, nomeadamente, por efeito de turbulência atmosférica com origem em gradiente térmico vertical acentuado na fundação da torre e alteração das coordenadas mundo dos alvos por efeito de expansão linear térmica. Refere-se, igualmente, que o intervalo de exatidão mencionado não inclui contribuições de incerteza de medição associadas à estabilidade dimensional e geométrica a longo prazo do referencial de medição e da câmara e, também, a efeitos dinâmicos. Atualmente, os fundamentos teóricos para análise metrológica de grandezas dinâmicas estão ainda em desenvolvimento, não existindo um enquadramento internacional consolidado no seio da comunidade metrológica que sustentasse a sua aplicação ao caso estudado

(deslocamento dinâmico). Esta tarefa constitui, deste modo, uma temática de interesse a concretizar no futuro.

Esta tese contém informação relevante sobre os fundamentos, os métodos e os meios necessários à generalização da abordagem óptica proposta no que respeita à utilização de componentes optoeletrónicos com origens (fabricantes) e características (modelos) distintas, e à aplicação a outro tipo de estruturas dinâmicas com elevada dimensão, para além das pontes suspensas. De facto, a solução de medição desenvolvida mostrou-se bastante adequada para aplicação neste tipo de infraestruturas, caracterizadas por uma elevada flexibilidade estrutural, e cujo comportamento dinâmico evidencia reduzidas frequências de vibração (inferiores a 1 Hz) e elevadas amplitudes de deslocamento (superiores a 1 m), sobretudo, a nível vertical.

Contudo, no caso da observação dimensional a longa distância – entre 100 m e 1000 m – de viadutos e barragens, a sua aplicabilidade é reduzida visto que este tipo de grandes obras apresenta deslocamentos dinâmicos com frequências de vibração mais elevadas (a frequência de aquisição do sensor de imagem pode não ser suficiente para uma análise dinâmica rigorosa da obra observada) e amplitudes bastante reduzidas, maioritariamente, na ordem de grandeza sub-milimétrica. Este último aspeto conduz a uma resolução angular bastante exigente (inferior a 1 μ rad) que não é satisfeita no atual contexto de câmaras comerciais (com distância focal compreendida entre 300 mm e 800 mm e dimensão do píxel variável entre 2,5 μ m e 10 μ m), mesmo para um nível elevado de exatidão de processamento digital de imagem (por exemplo, próximo de $\frac{1}{4}$ de píxel). Neste ponto define-se como desenvolvimento futuro, o estudo da aplicabilidade de observações dimensionais dinâmicas a curta e média distância (inferior a 100 m), o que poderá ser igualmente interessante no contexto de acompanhamento e estudo evolutivo de patologias em obras (fissuras, depósitos, fugas, erosões, por exemplo) em ambiente de campo ou laboratorial e com o devido suporte dimensional rastreado.

A análise da maturidade tecnológica do sistema de medição desenvolvido mostra que se encontra num nível bastante elevado (compreendido entre TRL 6 e

TRL 7)¹: princípio de medição estabelecido; formulação da abordagem de medição e da metodologia generalizada de dimensionamento; avaliação crítica dos aspetos teóricos e experimentais relevantes para a medição pretendida; consolidação e validação da componente laboratorial; demonstração experimental dos protótipos de calibração e de medição em cenário real de observação de uma infraestrutura dinâmica.

5.2 Considerações específicas para sistema de observação permanente

Numa perspetiva de aplicação em cenário de observação permanente, similar ao caso analisado da P25A, o estudo efetuado carece ainda de desenvolvimentos futuros que evidenciem um nível completo de prontidão tecnológica (TRL 9). Em particular, mencionam-se os seguintes aspetos:

- (i) o estudo alargado da variação sazonal das condições ambientais em cenário de observação num horizonte temporal reduzido (variação diurna/noturna) ou prolongado (variação anual associada às diferentes estações do ano) e do respetivo impacto na qualidade metrológica da medição dimensional;
- (ii) a integração de subsistema permanente de medição termohigrométrica nas regiões associadas a elevado gradiente térmico vertical no sistema de medição dimensional, de modo a permitir a correção, em tempo real, do efeito sistemático de refração atmosférica, sempre que tal se justifique;
- (iii) o desenvolvimento de processo de controlo dinâmico de parâmetros operacionais – abertura da câmara, tempo de exposição do sensor de imagem, limite de limiarização no processamento digital de imagem e intensidade de corrente nos LEDs dos alvos – decorrente do efeito de variação da temperatura e de iluminação natural por motivo de incidência solar, sombreamento ou cobertura de nuvens sobre os alvos com reflexo na qualidade de imagem dos alvos (por exemplo, o efeito de *blurring*, a perda de visibilidade dos alvos por

¹ Considera-se a escala TRL – *Technology Readiness Level* adotada pela Agência Espacial Europeia [ESA (2014)], que inclui nove níveis distintos de prontidão tecnológica de um sistema, onde TRL 1 corresponde ao nível mínimo (princípios básicos de funcionamento observados e registados) e TRL 9 é o nível máximo (aprovação do sistema concretizado com evidências do seu sucesso operacional).

escurecimento ou saturação da imagem e ainda atenuação atmosférica acentuada);

- (iv) o desenvolvimento e validação de estruturas de alojamento da câmara e dos alvos adequadas a exposição prolongada às condições ambientais e operacionais agressivas do cenário de observação, e respetiva classificação normativa (IP) no que respeita ao grau de proteção concedido;
- (v) a validação da estrutura computacional dedicada ao processamento, em tempo real, de uma elevada quantidade de informação digital, nomeadamente, no que respeita às atividades de diagnóstico, pré-processamento, parametrização, cálculo, validação de dados e sua redução e armanejamento, bem como dos meios computacionais de acesso, exploração, representação e manuseamento das medições dimensionais obtidas;
- (vi) a definição dos processos de integração e de avaliação da compatibilidade do sistema de medição óptica com o sistema geral de observação da infraestrutura e respetivos sistemas de medição constituintes.

BIBLIOGRAFIA

A

Abdel-Aziz, Y., Karara, H. (1971) – Direct Linear Transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry, in *Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry*, American Society of Photogrammetry, Urbana, Illinois (EUA), pp 1-18.

Aikada, M., Hiraki, T. (2009) – *Characteristic seasonal variation of vertical air temperature profile in urban areas of Japan*, Meteorol. Atmos. Phys., 104, Springer, pp. 95-102.

Almeida, E., Alexandrino, A., Fernandes, D. (2009) – Observações geodésicas em barragens, in 2º *Encontro Nacional de Geodesia Aplicada (ENGA)*, LNEC, Lisboa (Portugal).

Almeida, E. (2011) – Levantamentos por varrimento laser 3D em projectos de engenharia, in *Workshop em Fotogrametria e Varrimento Laser: Métodos, Técnicas e Aplicações*, Ordem dos Engenheiros, Lisboa (Portugal).

Anderson, J. E. e Vesterinen, A. (2006) – *Structural Health Monitoring Systems*, COWI A/S and Futurtec OY, Kongens Lyngby (Dinamarca).

Antunes, C. (2010) – *Geodesia I. Apontamentos da Licenciatura em Engenharia Geográfica*, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, FCUL, Lisboa (Portugal).

Armer, G. (2001) – *Monitoring and Assessment of Structures*, Spon Press, London (RU), ISBN 0-419-23770-4.

Avago (2006) – *HSDL-4260 High-Power T-1 ¼ (5 mm) AlGaAs Infrared (875 nm) Lamp Datasheet*, Avago Technologies.

B

Baldi, A., Bertolino, F. (2013) – Integrated digital image correlation for residual stress measurement, in *Proceedings Optical Metrology 2013*, Munique (Alemanha).

Balsamo, A., Di Ciommo, M., Mugno, R., Rebaglia, B., Ricci, E., Grella, R. (1999) – Evaluation of CMM Uncertainty through Monte Carlo Simulation, in *Annals of the CIRP*, vol. 48/1/1999.

Barnes, J., Rizos, C., Wang, J., Meng, X., Cosser, E., Dodson, A., Roberts, G. (2003) – The Monitoring of Bridge Movements using GPS and Pseudolites, in *Proceedings of the 11th FIG Symposium on Deformation Measurement*, Santorini (Grécia).

Barrel, H., Sears, J. E. (1939) – *The refraction and dispersion of air for the visible spectrum*, Philos. Trans. R. Soc. London Ser., 238, pp. 1-64.

Barzaghi, R., Pinto, L., Monaci, R. (2012) – The Monitoring of Gravity Dams: two tests in Sardinia, Italy, in *FIG Working Week 2012*, Roma (Itália).

Bauer, M., Griebbach, D., Hermerschmidt, A., Krüger, S., Scheele, M., Schischmanow, A. (2008) – *Geometrical camera calibration with diffractive optical elements*, Optics Express, vol. 16, no. 25, Optical Society of America (OSA).

Berberan, A., Ferreira, I., Portela, E., Oliveira, S., Oliveira, A., Baptista, B. (2011) – Overview on terrestrial laser scanning as a tool for dam surveillance, in *6th International Conference on Dam Engineering*, Lisboa (Portugal).

Brown, D. (1971) – Close-Range Camera Calibration, in *Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry*, Urbana, Illinois (EUA), pp. 855-866.

C

Caetano, E., Silva, S., Bateira, J. (2007) – Application of a vision system to the monitoring of cable structures, in *7th International Conference on Cable Dynamics*, Vienna (Austria).

Canny, J. (1986) – *A Computational Approach to Edge Detection*, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 8, no. 6, pp- 679-698.

Carvalho, F., Costa, C., Azevedo, F. (2008) – *Elementos de sistemas e de análise e processamento de sinais*, 1^a edição, LNEC, Lisboa (Portugal), ISBN 978-972-49-2126-6.

Casaca, J. (2000) – *A correcção instrumental e ambiental dos distânciómetros electromagnéticos*, Informação Técnica Barragens 20, LNEC, Lisboa (Portugal), ISBN 972-49-1860-2.

Casaca, J. (2004) – *A refração atmosférica em Geodesia Aplicada*, Informação Científica Barragens 9, LNEC, Lisboa (Portugal), ISBN 972-49-2012-7.

Castanheta, M., Silveira, P. (1999) – *Ensaio com Carga Ferroviária na Ponte Suspensa sobre o Tejo em Lisboa e respectivo Viaduto de Acesso Norte*, Relatório 200/99-DE/NOE, LNEC, Lisboa (Portugal).

Castro, A. (2012) – O Controlo de Segurança de Barragens de Betão, in *Jornadas LNEC – Engenharia para a Sociedade – Investigação e Desenvolvimento – Recursos Naturais e Energia*, LNEC, Lisboa (Portugal).

Clark, M., McCann, D., Forde, M. (2003) – *Application of infrared thermography to non-destructive testing of concrete and masonry bridges*, NDT&E International, vol. 36, pp. 265-275.

Ciddor, P. (1996) – *Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared*, Applied Optics, vol. 45, no. 9, pp. 1566-1573.

CIE 127 (2007) – *Measurement of LEDs*, 2nd edition, Technical Report 127, Commission Internationale de L'Eclairage (CIE), Vienna (Áustria), ISBN 978 3 901 906 58 9.

Cox, M, Daiton, M., Forbes, A., Harris, P., Schwenke, H., Siebert, B., Wôger, W. (2000) – Use of Monte Carlo simulation for uncertainty evaluation in Metrology, eds. Ciarlini, P., Cox, M., Filipe, E., Pavese, F., Richter, D., *Advanced Mathematical Tools in Metrology*, vol. V, Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences vol. 57, World Scientific Publishing, Singapore.

Cox, M., Harris, P. (2004) – *Uncertainty Evaluation. Software Support for Metrology. Best Practice Guide No. 6*, National Physical Laboratory (NPL), Teddington (RU).

Cox, M., Siebert, B. (2006-a) – *The use of a Monte Carlo method for evaluating uncertainty and expanded uncertainty*, *Metrologia*, 43, pp. S178-S188.

Cox, M., Forbes, A., Harris, P., Sousa, J. (2006-b) – Accounting for physical knowledge in obtaining measurement results and associated uncertainties, in *XVIII IMEKO World Congress*, Rio de Janeiro (Brasil).

Crosseto, M. (2009) – Deformation monitoring with terrestrial SAR interferometry, in *2º Encontro Nacional de Geodesia Aplicada (ENGA)*, LNEC, Lisboa (Portugal).

D

DG (2014) – <http://www.digitalglobe.com/resources/satellite-information> (acedido em 2014-02-21).

E

EA 4/02 (1999) – *EA 4/02: Expression of the uncertainty of measurement in calibration*, European co-operation for Accreditation (EA).

EADS (2014) – <http://www.astrium.eads.net/en/programme/spot-603.html> (acedido em 2014-02-21).

Edmund (2014) – *Optics and Optical Instruments Annual Catalog 2014*, E141A Edmund Optics Europe.

EMVA 1288 (2010) – *EMVA Standard 1288. Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras*, European Machine Vision Association, release 3.0.

ESA (2014) – <http://sci.esa.int/sre-ft/37710-strategic-readiness-level/> (acedido em 2014-11-04).

F

Faulkner, B., Barton, F., Baber, T., McKeel, W. (1996) – *Determination of bridge response using acceleration data*, Report FHWA/VA-97-R5, Virginia Transportation Research Council.

Flack, D. (2011) – *CMM Verification*, NPL Good Practice Guide No. 42, Issue 2, National Physical Laboratory (NPL), Teddington (RU), ISSN 1368-6550.

Figueiredo, E., Moldovan, I., Marques, M. (2013) – *Condition Assessment of Bridges: Past, Present and Future. A Complementary Approach*, Universidade Católica Editora, Lisboa (Portugal), ISBN 978-972-5-40402-7.

FLIR (2014) – <http://www.flir.com/cs/emea/en/> (acedido em 2014-03-05).

G

Garrett, A. (2007) – A Instrumentação no Controlo de Segurança de Grandes Obras. Perspectivas de Desenvolvimento, in *Encontro Nacional sobre a Instrumentação Científica e a Metrologia Aplicadas à Engenharia Civil – ICM 2007*, LNEC, Lisboa (Portugal).

Gåsvik, K. J. (1995) – *Optical Metrology*, 2nd edition, John Wiley & Sons, West Sussex (RU), ISBN 0-471-95474-8.

Giacomo, P. (1980) – *News from the BIPM*, Metrologia, 17, pp. 73-74.

Giacomo, P. (1981) – *News from the BIPM*, Metrologia, 18, pp. 43-44.

Giacomo, P. (1986) – *News from the BIPM*, Metrologia, 17, pp. 49-50.

GUM (1993) – *Guide to the expression of Uncertainty in Measurement*, International Organization for Standardization (ISO), 1st edition, Genève (Suíça), ISBN 92-67-10188-9.

Gonçalves, J., (2011) – Nuvens de pontos e modelos tridimensionais a partir de fotografias, in *Workshop em Fotogrametria e Varrimento Laser: Métodos, Técnicas e Aplicações*, Ordem dos Engenheiros, Lisboa (Portugal).

H

Hartley, R., Zisserman, A. (2003) – *Multiple View Geometry in Computer Vision*, 2nd edition, Cambridge University Press, New York (EUA), ISBN 978-0-521-54051-3.

Hecht, E. (1991) – *Óptica*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa (Portugal).

Heikkilä, J., Silvén, O. (1997) – A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction, in *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition – Proceedings CVPR 1997*, IEEE Computer Society, San Juan (Porto Rico).

Hieronimus (2012) – Comparison of methods for geometric camera calibration, in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – XXII ISPRS Congress*, volume XXXIX-B5, Melbourne (Austrália).

Holoeye (2012) – www.holoeye.com (acedido em 2012-03-15).

Howarth P., Redgrave, F. (2008) – *Metrology in short*, 3rd edition, EURAMET, ISBN 978-87-988154-5-7.

I

IDS (2014) – <https://www.idscorporation.com/georadar/> (acedido em 2014-02-19).

IEC 60529 (2013) – *Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)*, edition 2.2, International Electrotechnical Commission (IEC), ISBN 978-2-8322-1086-4.

Imperx (2004) – *Camera Link PCMCIA Video Capture Card*, rev.1, Imperx, Boca Raton, Flórida (EUA).

Imperx (2005) – *FrameLink User's Manual*, rev. RA7, Imperx, Boca Raton, Flórida (EUA).

Imperx (2006) – *LYNX Hardware User's Manual (CameraLink and GigE models)*, rev.7, Imperx, Boca Raton, Flórida (EUA).

ISI-SYS (2014) – http://www.isi-sys.com/html/product_overview1.html (acedido em 2014-03-12).

ISO 9022-22 (2012) – *Optics and photonics. Environmental test methods. Part 22: Combined cold, dry heat or temperature change with bump or random vibration*, 1st edition, International Organization for Standardization (ISO), Genève (Suíça).

J

Jaynes, E. (1957) – *Information Theory and Statistical Mechanics*, The Physical Review, vol. 106, no. 4, pp. 620-630.

Jiang, R., Jáuregui, D., White, K. (2008) – *Close-range photogrammetry applications in bridge measurement: Literature review*, Measurement, 41, pp. 823-834.

K

Kharaghani, G. (1987) – *Propagation of refraction errors in trigonometric height traversing and geodetic leveling*, Technical Report 132, Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, New Brunswick (Canadá).

Kracker, R., Jones, A. (2003) – *On use of Bayesian statistics to make the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement consistent*, Metrologia, 40, pp. 235-248.

Khoo, V., Tor, Y., Ong, G. (2010) – *Monitoring of High Rise Building using Real-Time Differential GPS*, in *Proceedings of the FIG Congress 2010*, Sidney (Austrália).

Kiger, K. (2010) – *Introduction to Particle Image Velocimetry*, The A. James School of Engineering, University of Maryland.

Kim, I., McArthur, B., Korevaar, E. (2001) – *Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications*, in *SPIE Proceeding: Optical Wireless Communications III*, vol. 4214, pp. 26-37.

Krüger, S., Scheele, M., Schuster, R. (2005) – *New calibration scheme for panoramic line scanners*, in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – Proceedings of the 2nd Panoramic Photogrammetry Workshop*, volume XXXV-5/W8, Berlin (Alemanha).

L

Labsphere (2014) – *The Radiometry of Light Emitting Diodes*, Technical Guide, Labsphere.

Lagarias, J., Reeds, J., Wright, P. (1998) – *Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions*, SIAM Journal of Optimization, vol. 9, no. 1, pp. 112-147.

Leaning, M., Finkelstein, L. (1979) – A Probabilistic Treatment of Measurement Uncertainty in the Formal Theory of Measurement, in *IMEKO VIII World Congress*, Moscovo (Rússia).

Lee, J., Shinozuka, M. (2006) – *Real-Time Displacement Measurement of a Flexible Bridge Using Digital Image Processing Techniques*, Experimental Mechanics, 46, pp. 105-114.

Lira, I. (2002) – *Evaluating the measurement uncertainty. Fundamentals and practical guide*, 1st edition, Institute of Physics Publishing.

M

Macdonald, J., Dagless, E., Thomas, B., Taylor, C. (1997) – Dynamic measurements of the Second Severn Crossing, in *Proceedings Instrumentation Civil Engineers – Transport*, vol. 123, pp. 241-248.

Marcelino, J. (2012) – O Controlo de Segurança de Barragens de Aterro, in *Jornadas LNEC – Engenharia para a Sociedade – Investigação e Desenvolvimento – Recursos Naturais e Energia*, LNEC, Lisboa (Portugal).

Marécos, J., Pereira, J. (1964) – *Estudo do comportamento dinâmico dos pilares P3 e P4 da Ponte sobre o Tejo*, LNEC, Lisboa (Portugal).

Marécos, J., Castanheta, M., Trigo, J. (1967) – *Observação da Ponte sobre o Tejo em Lisboa*, LNEC, Lisboa (Portugal).

Marécos, J., Castanheta, M., Trigo, J. (1969) – *Field observation of Tagus river suspension bridge*, Journal of the Structural Division, American Society of Civil Engineers (ASCE), vol. 95, no. 4, New York (EUA), pp. 555-583.

Marécos, V. (2007) – *Controlo de Segurança de Pontes em Tempo Real*, Dissertação de Mestrado do IST-UTL, Lisboa (Portugal).

MATLAB (2010) – www.mathworks.com (acessos diversos).

Matsumoto, M., Nishimura, T. (1998) – *Mersenne twister: a 623-dimensionally equidistributed uniform pseudo-random number generator*, ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation, vol. 8, no. 1, pp. 3-30.

MOP-GPT (1966) – *A Ponte Salazar*, Gabinete da Ponte sobre o Tejo, Ministério das Obras Públicas, Lisboa (Portugal).

Moura, G. (2005) – *Determinação de tensões a partir de extensões observadas em barragens de betão*, Dissertação de Mestrado da FEUP, Porto (Portugal).

N

NASA (2014) – <http://landsat.gsfc.nasa.gov/> (acedido em 2014-02-21).

NOPTTEL (2014) – <http://www.noptel.fi/eng/nms/index.php> (acedido em 2014-02-10).

NP EN 1990 (2009) – *Eurocódigo. Bases para o projecto de estruturas*, Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica (Portugal).

NP EN ISO/IEC 17025 (2005) – *Requisitos gerais de competência para laboratórios de ensaio e calibração*, Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica (Portugal).

O

Olaszek, P. (1999) – *Investigation of the dynamic characteristic of bridge structures using a computer vision method*, Measurement, 25, pp. 227-236.

Oliveira, A. (2011) – Geoinformação 3D a partir de varrimento laser 3D terrestre. Aplicações, in *Workshop em Fotogrametria e Varrimento Laser: Métodos, Técnicas e Aplicações*, Ordem dos Engenheiros, Lisboa (Portugal).

P

Palma, J. (2010) – *Instrumentação*, apontamentos para acção de formação do LNEC, Lisboa (Portugal).

Park, K., Kim, S., Park, H., Lee, K. (2005) – *The determination of bridge displacement using measured acceleration*, Engineering Structures, 27, pp. 371-378.

Pereira, J., Trigo, J. (1967) – *Ensaio de carga da Ponte sobre o Tejo: Viaduto Norte*, LNEC, Lisboa.

Picard, A., Davis, R., Gläser, M., Fujii, K. (2008) – *Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007)*, Metrologia, 45, pp. 149-155.

Pieraccini, M., Luzi, A., Fratini, D., et al (2004) – *Remote sensing of building structural displacements using microwave interferometer with imaging capability*, NDT&T International, 34, pp. 545-550.

Q

Qiao, Y. (1984) – *The solution of the ray-path differential equation in the axial gradient-index media*, Acta Optica Sinica, 4, 1.

R

- Rabinovich, S. (2000) – *Measurement Errors and Uncertainties. Theory and Practice*, 2nd edition, AIP Press, New York (EUA).
- Raposo, E. (2011) – *Observação de deslocamentos em obras geotécnicas*, Dissertação de Mestrado da FCT-UNL, Caparica (Portugal).
- Redweik, P., (2010) – *Fotogrametria Analítica*, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, FCUL, Lisboa (Portugal).
- Redweik, P., (2011) – Fotogrametria em projectos de monitorização, in *Workshop em Fotogrametria e Varrimento Laser: Métodos, Técnicas e Aplicações*, Ordem dos Engenheiros, Lisboa (Portugal).
- Ribeiro, A. (2006) – *Avaliação de Incertezas de Medição em Sistemas Complexos Lineares e Não-lineares*, Tese de Doutoramento da FCUL, LNEC, Lisboa (Portugal).
- Ribeiro, A., Sousa, A., Costa, C., Cox, M., Harris, P. (2009) – The propagation of uncertainty related to the calibration functions of platinum resistance thermometers and possible correlation effects, eds. Pavese, F., Bär, M., Forbes, A., Linares, J., Perruchet, C., Zhang, N., *Advanced Mathematical Tools in Metrology and Testing VIII*, World Scientific Publishing, Singapura, pp. 273-278, ISBN 981-283-951-8.
- Rito, A. (2013) – Bridge inspections as a tool for rehabilitation, design and maintenance, eds. Figueiredo, E., Moldovan, I., Marques, M., *Condition Assessment of Bridges: Past, Present and Future. A Complementary Approach*, Universidade Católica Editora, Lisboa (Portugal), ISBN 978-972-5-40402-7.
- Rodrigues, J. (2004) – *Identificação Modal Estocástica. Métodos de análise e aplicações em estruturas de engenharia civil*, Tese de Doutoramento da FEUP, Porto (Portugal).
- Rodrigues, J. (2011-a) – *Medição de vibrações na Ponte 25 de Abril durante a 20ª meia Maratona de Lisboa. Análise preliminar das medições efectuadas*, Nota Técnica 5/2011, LNEC, Lisboa (Portugal).
- Rodrigues, J., Ledesma, M. (2011-b) – *Monitorização estrutural da Ponte 25 de Abril. Apresentação de medições efectuadas em Setembro de 2010*, Nota Técnica 3/2011, LNEC, Lisboa (Portugal).
- Roque, D., Afonso, N., Fonseca, A., Heleno, S. (2012) – Delimitação de cheias no Rio Tejo através de imagens SAR, in *3º Encontro Nacional de Geodesia Aplicada (ENGA)*, LNEC, Lisboa (Portugal).
- RSB (2007) – Decreto-Lei n.º 344/2007 de 15 de Outubro associado ao Regulamento de Segurança de Barragens (RSB).
- R1 CGPM (1983) – Resolution 1 of the CGPM, Giacomo, P., *News from the BIPM*, Metrologia, 20 (1), 1984, pp 25-30.

S

S1-GUM (2008) – *Evaluation of measurement data. Supplement 1 to the “Guide to the expression of Uncertainty in Measurement”. Propagation of distributions using a Monte Carlo method*, 1st edition, Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM).

S2-GUM (2011) – *Evaluation of measurement data. Supplement 2 to the “Guide to the expression of Uncertainty in Measurement”. Extension to any number of output quantities*, 1st edition, Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM).

Sandau, R. (2010) – *Digital Airborne Camera. Introduction and Technology*, Chapter 5, Springer, Berlin (Alemanha), ISBN 978-1-4020-8877-3.

Santos, C. (2011) – *Técnicas de processamento de imagem para a medição de deslocamentos. Aplicação à medição dos deslocamentos verticais e transversais de tabuleiros de pontes suspensas ou atirantadas*, Tese de Doutoramento da FCT-UC, LNEC, Lisboa (Portugal).

Santos, L., Min, X., (2007-a) – Ensaios de carga no viaduto de Vila Pouca de Aguiar, in *Encontro Nacional sobre a Instrumentação Científica e a Metrologia Aplicadas à Engenharia Civil – ICM 2007*, LNEC, Lisboa (Portugal).

Santos, C., Costa, C., Batista, J. (2007-b) – Disponibilidade ao longo do tempo de um sistema óptico de medição de deslocamentos da P25A, in *Encontro Nacional sobre a Instrumentação Científica e a Metrologia Aplicadas à Engenharia Civil – ICM 2007*, LNEC, Lisboa (Portugal).

Santos, C., Costa, C. (2006) – *Propagação através da atmosfera de ondas electromagnéticas do espectro do visível e do infravermelho próximo*, Relatório 316/2006-CIC, LNEC, Lisboa (Portugal).

Santos, L. (2008) – Avaliação do desempenho estrutural de pontes, in *Gestão da Segurança e da Operação e Manutenção de Redes Rodoviárias e Aeroportuárias*, LNEC, Lisboa (Portugal).

Santos, L. (2013) – Visual inspections as a tool to detect damage: current practices and new trends, eds. Figueiredo, E., Moldovan, I., Marques, M., *Condition Assessment of Bridges: Past, Present and Future. A Complementary Approach*, Universidade Católica Editora, Lisboa (Portugal), ISBN 978-972-5-40402-7.

Schwenke, H., Siebert, B., Wäldele, F., Kunzmann, H. (2000) – *Assessment of Uncertainties in Dimensional Metrology by Monte Carlo Simulation: Proposal of a Modular and Visual Software*, Annals of the CIRP, vol. 49/1/2000.

Schwenke, H., Neuschaefer-Rube, U., Pfeifer, T., Kunzmann, H. (2002) – *Optical methods for dimensional metrology in production engineering*, CIRP Annals – Manufacturing Technology, vol. 51, issue 2, pp. 685-699.

Shannon, C. (1948) – *A Mathematical Theory of Communication*, The Bell System Technical Journal, 27, pp. 379-423, pp. 623-656.

Shannon, C. (1949) – Communication in the Presence of Noise, in *Proceedings of the IRE*, vol. 37, no. 1, pp. 10-21.

Shortis, M., Clarke, T., Short, T. (1994) – Comparison of some techniques for subpixel location of discrete target images, in *Proceedings of SPIE Conference on Videometrics III*, vol. 2350, Boston, Massachusetts (EUA), pp. 299-250.

Siebert, B. (1999) – Discussion of Methods for the Assessment of Uncertainties in Monte Carlo Particle Transport Calculations, eds. Ciarlini, P., Forbes, A., Pavese, F., Richter, D., *Advanced Mathematical Tools in Metrology*, vol. IV, Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences vol. 53, World Scientific Publishing, Singapore.

Silveira, P. (2002-a) – *Plano Geral de Observação da Ponte 25 de Abril e Viaduto de Acesso Norte*, Nota Técnica 5/02-DE/NOE, LNEC, Lisboa (Portugal).

Silveira, P. (2002-b) – *Plano Geral de Observação da Ponte 25 de Abril e Viaduto de Acesso Norte (2ª versão)*, Nota Técnica 7/02-DE/NOE, LNEC, Lisboa (Portugal).

Sousa, J., Ruiz, A., Bastos, L. (2012) – Monitoring of man-made structures using InSAR techniques, in 3º *Encontro Nacional de Geodesia Aplicada (ENGA)*, LNEC, Lisboa (Portugal).

Stamatopoulos, C. (2011) – *Orientation and Calibration of Long Focal Length Cameras in Digital Close-Range Photogrammetry*, PhD Thesis, Department of Infrastructure Engineering, University of Melbourne, Melbourne (Austrália).

Stephen, G., Brownjohn, J., Taylor, C. (1993) – *Measurement of static and dynamic displacement from visual monitoring of the Humber bridge*, *Engineering Structures*, vol. 15, no. 3, pp. 197-208.

Stirling, D. (2001) – Photogrammetry: theory and technology, ed. Armed G., *Monitoring and Assessment of Structures*, Chapter 3, Spon Press, London (RU), ISBN 0-419-23770-4.

Sutton, M., Orteu, J., Schreier, H. (2009) – *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*, Springer, New York (EUA), ISBN 978-0-387-78746-6.

Szeliski, R. (2011) – *Computer Vision. Algorithms and Applications*, Springer, New York (EUA), ISBN 978-1-84882-934-3.

T

Tarchi, D., Ohlmer, E., Sieber, A. (1997) – *Monitoring of Structural Changes by Radar Interferometry*, *Research in Nondestructive Evaluation*, 9, pp. 213-225.

Torge, W. (2001) – *Geodesy*, 3rd edition, Chapter 5, De Gruyter, Berlin (Alemanha).

Tsai, R. (1987) – *A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses*, IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. RA-3, no. 4.

V

Valença, J., Júlio, E., Araújo, H. (2007) – Aplicações de fotogrametria na monitorização de estruturas, in *Encontro Nacional sobre a Instrumentação Científica e a Metrologia Aplicadas à Engenharia Civil – ICM 2007*, LNEC, Lisboa (Portugal).

VIM (2012) – *Vocabulário Internacional de Metrologia*, 1ª edição, Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica (Portugal), ISBN 978-972-763-00-6.

W

Wahbeh, A., Caffrey, J., Masri, S. (2003) – *A vision-based approach for the direct measurement of displacements in vibrating systems*, Smart Materials and Structures, 12, pp. 785-794.

Webb, E. (1984) – *Temperature and Humidity Structure in the Lower Atmosphere in Geodetic Refraction*, Springer, Berlin (Alemanha).

Weise, K., Wöger, W. (1992) – *A Bayesian theory of measurement uncertainty*, Meas. Sci. Technol., 3, pp. 1-11.

Weise, K., Zhang, H. (1997) – *Uncertainty treatment in Monte Carlo simulation*, J. Phys. A: Math. Gen., 30, pp. 5971-5980.

Wikipedia (2014) – <http://en.wikipedia.org> (acessos diversos em 2014-02).

Willebrand, H., Ghuman, B. (2001) – *Free-Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks*, Chapter 3, Sams Publishing, Indianapolis, Indiana (EUA), ISBN 067232248.

Wong, K., Man, K., Chan, W. (2001) – *Monitoring Hong Kong's Bridges. Real-Time Kinematic Spans the Gap*, GPS World.

Z

Zhang, Z. (2000) – *A Flexible New Technique for Camera Calibration*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 22, no. 11.

ANEXO 1

Expressões para cálculo da refratividade do ar húmido

De acordo com [Ciddor (1996)], a expressão da refratividade¹ do ar húmido corresponde a

$$10^8(n-1) = 10^8 \left[\frac{\rho_a}{\rho_{as}} (n_{as} - 1) + \frac{\rho_w}{\rho_{ws}} (n_{ws} - 1) \right], \quad (A1.1)$$

onde:

- (i) ρ_{as} e n_{as} são, respetivamente, a massa volúmica e o índice de refração do ar seco em condições normalizadas (15 °C, 101325 Pa, 0% hr, 450 ppm de CO₂);
- (ii) ρ_{ws} e n_{ws} são, respetivamente, a massa volúmica e o índice de refração do vapor de água puro em condições normalizadas (20 °C e 1333 Pa);
- (iii) ρ_a e ρ_w são, respetivamente, a massa volúmica do ar seco e do vapor de água para as condições ambientais do cenário de observação.

No que respeita à refratividade do ar seco em condições normalizadas [Ciddor (1996)] recorre ao seguinte modelo

$$10^8(n_{as} - 1) = \frac{k_1}{k_0 - \sigma^2} + \frac{k_3}{k_2 - \sigma^2}, \quad (A1.2)$$

ou, em alternativa, quando se pretende contabilizar, de forma mais exata, o efeito do dióxido de carbono,

$$(n_{as} - 1) = (n_{as} - 1) \left[1 + 0,534 \times 10^{-6} (x_c - 450) \right], \quad (A1.3)$$

em que x_c representa a quantidade de dióxido de carbono (expressa em ppm) e σ é o número de onda (corresponde ao inverso do comprimento de onda da radiação expresso em μm), tendo como constantes $k_0 = 238,0815 \mu\text{m}^{-2}$, $k_1 = 5792105 \mu\text{m}^{-2}$, $k_2 = 57,362 \mu\text{m}^{-2}$, e $k_3 = 167917 \mu\text{m}^{-2}$.

¹ A relação entre refratividade, N , e índice de refração, n , corresponde a $N = 10^8(n - 1)$.

Por sua vez, [Ciddor (1996)] recorre ao modelo corrigido de Barrel e Sears [Barrel (1939)] para cálculo da refratividade do vapor de água em condições normalizadas,

$$10^8(n_{\text{ws}} - 1) = 1,022(w_0 + w_1\sigma^2 + w_2\sigma^4 + w_3\sigma^6), \quad (\text{A1.4})$$

onde $w_0 = 295,235 \mu\text{m}^{-2}$, $w_1 = 2,6422 \mu\text{m}^{-2}$, $w_2 = -0,032380 \mu\text{m}^{-4}$ e $w_3 = 0,004028 \mu\text{m}^{-6}$.

O cálculo da grandeza massa volúmica do ar húmido (da qual se determina a massa volúmica do ar seco ou do vapor de água em condições normalizadas ou observadas) é suportado na expressão recomendada pelo CIPM [Picard (2008)]

$$\rho = \left(\frac{p M_a}{Z R T} \right) \left[1 - x_w \left(1 - \frac{M_w}{M_a} \right) \right], \quad (\text{A1.5})$$

onde

- (i) M_a é a massa molar do ar seco (expressa em $\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$) contendo x_c ppm de dióxido de carbono, dada por

$$M_a = 10^{-3} [28,9635 + 12,011 \times 10^{-6} (x_c - 400)]; \quad (\text{A1.6})$$

- (ii) M_w é massa molar do vapor de água igual a $0,018015 \text{ kg}\cdot\text{mol}^{-1}$;
- (iii) T é a temperatura expressa em kelvin;
- (iv) R é a constante universal dos gases perfeitos igual a $8,314510 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;
- (v) p representa a pressão total expressa em pascal;
- (vi) x_w corresponde à fração molar do vapor de água no ar húmido;
- (vii) Z é o fator de compressibilidade do ar húmido.

Esta última variável – fator de compressibilidade – é obtida através da seguinte expressão

$$Z = 1 - \left(\frac{p}{T} \right) [a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + (b_0 + b_1 \cdot t)x_w + (c_0 + c_1 \cdot t)x_w^2] + \left(\frac{p}{T} \right)^2 (d - e \cdot x_w^2), \quad (\text{A1.7})$$

em que $a_0 = 1,58123 \times 10^{-6} \text{ K} \cdot \text{Pa}^{-1}$, $a_1 = -2,9331 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$, $a_2 = 1,1043 \times 10^{-10} \text{ K}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$,
 $b_0 = 5,707 \times 10^{-6} \text{ K} \cdot \text{Pa}^{-1}$, $b_1 = -2,051 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$, $c_0 = 1,9898 \times 10^{-4} \text{ K} \cdot \text{Pa}^{-1}$,
 $c_1 = -2,376 \times 10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$, $d = 1,83 \times 10^{-11} \text{ K}^2 \cdot \text{Pa}^{-2}$ e $e = -0,765 \times 10^{-8} \text{ K}^2 \cdot \text{Pa}^{-2}$. Note-se
que t corresponde à temperatura expressa em grau Celsius, ou seja, $t = T - 273,15$.

A fração molar do vapor de água pode ser determinada através de

$$x_w = \frac{hr \cdot p_{\text{sat}} \cdot f}{p}, \quad (\text{A1.8})$$

em que

- (i) hr corresponde à humidade relativa (expressa de forma não-percentual);
- (ii) p representa a pressão total em pascal;
- (iii) p_{sat} é a pressão de saturação do vapor de água (sobre superfície líquida de água), expressa em pascal e dada por

$$p_{\text{sat}} = \exp\left(A \cdot T^2 + B \cdot T + C + \frac{D}{T}\right), \quad (\text{A1.9})$$

em que $A = 1,2378847 \times 10^{-5} \text{ K}^{-2}$, $B = -1,9121316 \times 10^{-2} \text{ K}^{-1}$, $C = 33,93711047$
e $D = -6,3431645 \times 10^3 \text{ K}$.

- (iv) f é o fator de melhoria (*enhancement factor*, na designação anglo-saxónica) do vapor de água, correspondendo a

$$f = \alpha + \beta \cdot p + \gamma \cdot t^2, \quad (\text{A1.10})$$

onde $\alpha = 1,00062$, $\beta = 3,14 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$ e $\gamma = 5,6 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$.

Expressões do MMQ para cálculo dos parâmetros do modelo de potência do índice de refração vertical

O modelo paramétrico não-linear de potência adoptado no estudo da evolução vertical do índice de refração junto à superfície de topo da fundação da torre sul da P25A é obtido por aplicação do MMQ ao conjunto de pares de valores experimentais (n_i, Y_i) do índice de refração do ar húmido n_i calculado com base em medições termohigrométricas diretas a uma altura Y_i . Para tal é necessário que o modelo (não-linear) de potência

$$n(Y) = a \cdot Y^b, \quad (\text{A2.1})$$

seja expresso de forma linear através de

$$\log[n(Y)] = \log(a) + b \cdot \log(Y). \quad (\text{A2.2})$$

A aplicação do MMQ à expressão (A2.2) permite o cálculo das estimativas dos parâmetros a e b através das expressões

$$b = \frac{\sum_i \left\{ \left[\log(n_i) - \frac{\sum_i \log(n_i)}{s} \right] \cdot \left[\log(Y_i) - \frac{\sum_i \log(Y_i)}{s} \right] \right\}}{\sum_i \left[\log(Y_i) - \frac{\sum_i \log(Y_i)}{s} \right]^2}, \quad (\text{A2.3})$$

e

$$a = \exp \left[\frac{\sum_i \log(n_i)}{s} - b \cdot \frac{\sum_i \log(Y_i)}{s} \right], \quad (\text{A2.4})$$

onde s corresponde à dimensão da amostra dos valores experimentais (n_i, Y_i) .

No que respeita ao cálculo das variâncias dos parâmetros, a aplicação ao MMQ ao caso em estudo permite escrever

$$\text{var}(b) = \frac{\sigma^2}{\sum_i \left[\log(Y_i) - \frac{\sum_i \log(Y_i)}{s} \right]^2}, \quad (\text{A2.5})$$

$$\text{var}(a) = \sigma^2 \cdot \frac{1}{s} + \frac{\frac{\sum_i \log(Y_i)}{s}}{\sum_i \left[Y_i - \frac{\sum_i \log(Y_i)}{s} \right]^2}, \quad (\text{A2.6})$$

onde

$$\sigma^2 = \frac{1}{s-2} \sum_i \left\{ \left[\log(n_i) - \left[\log(a) + b \cdot \log(Y_i) \right] \right]^2 \right\}. \quad (\text{A2.7})$$

Por último, menciona-se a expressão para determinação da covariância entre os dois parâmetros do modelo

$$\text{cov}(a, b) = - \frac{\sigma^2 \cdot \frac{\sum_i \log(Y_i)}{s}}{\sum_i \left[\log(Y_i) - \frac{\sum_i \log(Y_i)}{s} \right]^2}, \quad (\text{A2.8})$$

a qual permite conhecer o respetivo coeficiente de correlação dado por

$$r(a, b) = \frac{\text{cov}(a, b)}{u(a) \cdot u(b)}. \quad (\text{A2.9})$$

em que

$$u(a) = \sqrt{\text{var}(a)}, \quad (\text{A2.10})$$

e

$$u(b) = \sqrt{\text{var}(b)}. \quad (\text{A2.11})$$